

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Zweifelhafte Verkündigung der dritten Art

Selten wurde ein bedeutendes wissenschaftliches Resultat öfter herausposaunt als die Analyse des menschlichen Genoms: Einmal am 26. Juni 2000, zum zweiten Mal im Januar 2001, und nun soll der Text des menschlichen Erbguts zum dritten Mal im kommenden Jahr publiziert werden.

Bill Clinton, damals noch im Weißen Haus, beschwor schon beim ersten Mal „die Vollendung der ersten Erfassung“. Craig Venter, bis vor kurzem Chef von Celera Genomics, sah gar den „Wendepunkt in den 100 000 Jahren verbürgter menschlicher Geschichte“ gekommen. Dabei war Fachleuten klar, dass sowohl bei der ersten als auch der zweiten Verkündigung lediglich unvollständige, grob entzifferte „Arbeitsentwürfe“ des Genoms vorlagen. Ende letzten Jahres ertönte schließlich die dritte Ankündigung der vollständigen Erbgut-Entzifferung: „Bis zum Frühjahr 2003“, versprachen die Forscher der Human Genome Research Group im Wissenschaftsblatt *Nature* (Bd. 414, S. 854, 2001), wolle man das „Buch der Menschengene“ endgültig aufgeschrieben haben.

Das Publikum staunt und fragt sich, ob nun eine Ankündigungswissenschaft um sich greift, ähnlich dem Ankündigungsjournalismus, mit dem Presse- und Marketingabteilungen längst die Medien verstopfen. Leider ist das wohl so – zum Schaden der Forschungsreputation. Denn zwei Gefahren belasten solches Treiben: „zu früh“ und „falsch“. Zu frühes Krähen und Trommeln schafft zwar Schlagzeilen, verspielt aber jede Glaubwürdigkeit, wenn die Substanz fehlt.

Gut war, dass Craig Venter durch stürmisches Vorpreschen mit seiner eigenen „Schrotschuss“-Entzifferungsmethode das Genomprojekt um mindestens fünf Jahre abkürzte. Schlecht war, dass dadurch ein hektischer, wie im Profisport von Kommerzinteressen getriebener Wettlauf um Rekorde angestachelt wurde, der in verfrühten Ankündigungen resultierte.

Krachende Flops schaden dem Forschungsimage und beschädigen die wissenschaftlichen Informationskanäle. In unguter Erinnerung sind Stichworte wie „Kalte Fusion“, „Polywasser“ oder „Leben auf dem Mars“. In all diesen Fällen bestimmte Publizitätsgier Art und Zeitpunkt der Veröffentlichung – der Nachweis des Irrtums kam dann stets viel kleinlauter, Jahre danach, versteckt in Randspalten der Fachpresse. Mehr Zurückhaltung und gelasseneres Warten auf Begutachtung durch Fachkollegen würde dem Image der Forschung gut tun.



Meldung aus der Redaktion: Anfang dieses Monats starteten wir mit einer neuen Zeitschrift: „Gehirn & Geist“. In der Spektrum-Tradition berichten hier führende Wissenschaftler über aktuelle Erkenntnisse in Hirnforschung, Psychologie, Neurologie und Künstlicher Intelligenz – zunächst vierteljährlich. „Die Neugier des Menschen, etwas über sich selbst zu erfahren, ist unstillbar“, notierte einst Aristoteles. Vielleicht wollen ja auch Sie wissen, was in (und mit) Ihrem Kopf so alles los ist.

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Naturstoff im Reagenzglas nachgebessert**
Gentechnische Optimierung von Interferon gegen Muskelschwund

15 **Nachgehakt**
Kein KO-Sieg für Knockout-Ferkel

16 **Lazarus und das große Fressen**
Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher erfolgreich simuliert

24 **Interview**
„Das ist ein ständiger Kampf“
Erwartungen an die neuen Gravitationswellen-Detektoren

26 **Frühwarn-Informations-System für Vulkane**
Schlafenden Feuerbergen in Europa wird auf den Zahn gefühlt

29 **Bild des Monats**
„E.T.“ im Bernstein

SPEKTROGRAMM

50 **Code X der Menschwerdung • Flotte Dinos • Das Antlitz der Lüge • Natur als Umweltsünder • Röntgenblick ins Herz der Galaxis • Antarktischer Eisschild wächst • Schocktherapie für Raucher**

THEMEN

30 **Interstellares Medium**
Der Stoff, aus dem die Sterne sind

42 **TITELTHEMA: Arbeitsfeld: forensische Entomologie**
Was Insekten über Leichen verraten

52 **Rache ist süß**
Experimente zur Fairness

60 **Die Diabetes-Epidemie**
Neue Ansichten zur Bekämpfung

70 **Menschheit am Scheideweg**
Bevölkerungsexplosion, Ressourcenraubbau und Umweltzerstörung bringen die Erde an den Abgrund

82 **Original oder Fälschung?**
Wertvolle Emaillen im Röntgenlicht

88 **Das zweite Leben der PCs ...**
... als Supercomputer

TITELBILD:

Kopf einer Schmeißfliegen-Made, von der Bauchseite gesehen. Auf der kolorierten Aufnahme sieht man im „Gesicht“ der Made die spitz auslaufenden so genannten Mundwerkzeuge. Oft erkennen Insektenkundler erst an der Form dieser Fresswerkzeuge die Fliegenart.

Bildquelle: eye of science

TITELTHEMA

Insekten als Leichenbewohner

Seite 42



Viele Gliedertiere leben von Kadavern – doch jede Art hat dabei ihre besondere Zeit. Aus dem Muster der Bewohner erfahren Insektenkundler vieles über die Geschichte einer Leiche.



ASTRONOMIE Seite 30

Das Gas zwischen den Sternen

Wie eine Atmosphäre hüllt das interstellare Medium unser Milchstraßensystem ein. Explodierende Sterne erzeugen darin riesige Leerräume und gewaltige Fontänen aus heißem Gas, aus dem letztlich wieder neue Himmelskörper entstehen.



VERHALTENSPSYCHOLOGIE Seite 52

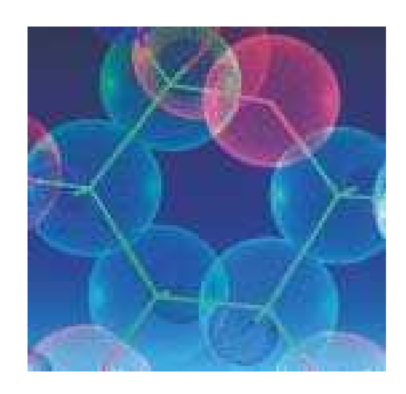
Teilen und Helfen – Ursprünge sozialen Verhaltens

Nicht der Eigennutz ist die Haupttriebfeder menschlichen Verhaltens; Experimente zeigen, dass Prinzipien wie Fairness unser Handeln weit stärker beeinflussen als bislang angenommen.

MEDIZIN Seite 60

Die Diabetes-Behandlung der Zukunft

Einer Epidemie gleich explodiert weltweit die Zahl der Zuckerkranken. Von neuen Ansätzen erhoffen sich Experten bessere Möglichkeiten der Behandlung und Vorbeugung.



ZUKUNFT DER MENSCHHEIT Seite 70

Die Erde am Abgrund

Das gerade angebrochene Jahrhundert wird zur Bewährungsprobe für unsere wissenschaftlich-technische Zivilisation. Wir treiben auf einen ökonomischen Engpass zu, der nur durch radikales Umdenken zu bewältigen ist.



SPEKTROSKOPIE Seite 82

Kunst im Röntgenstrahl

Maleremaillen aus Limoges waren in der Renaissance heiß begehrt. Ein paar Jahrhunderte später kamen sie erneut in Mode und Imitationen überschwemmten den Markt. Wie sie unterscheiden? Ein Fall für die moderne Röntgenspektroskopie.



HYPERCOMPUTER II Seite 88

Der selbst gebastelte Supercomputer

Beowulf-Cluster bieten höchste Rechenleistungen mit bescheidensten Mitteln: schrottreifen PCs.



FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

98 **Die Hethiter – eine antike Großmacht wird rekonstruiert**
Archäologen entreißen eine altorientalische Kultur dem Vergessen

100 **Umweltpolitik – eine Sache von gestern?**
Mainauer Gespräche

103 **Ausgezeichnet**
Max-Planck-Forschungspreis und Max-Born-Preis

REZENSIONEN

106 **Die sexuelle Evolution** von G. F. Miller
Wenn Mumien erzählen von R. David und R. Archbold
Von Menschen und Ameisen von A. Gandolfi
Schön scheußlich von N. Angier
Gene, Gicht und Gallensteine von M. Reitz
Kopenhagen* und *Oxygen
Schauspiele mit wissenschaftlichem Thema

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

114 **Gewinnen im Zahlenlotto**

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
8 **Leserbriefe**
9 **Impressum**
80 **Wissenschaft im Alltag**
Die Computermaus
104 **Wissenschaft in Unternehmen**
113 **Wissenschaft im Internet**
120 **Stellenmarkt**
Lehre und Forschung
132 **Im Rückblick**
133 **Preisrätsel**
134 **Vorschau**

Gibt es ein unsichtbares Artensterben? – Januar 2002

Mit dem Seziermesser der praktischen Philosophie

Der Artikel ist sehr ausgewogen, indem er einerseits eindringlich vor dem Artensterben warnt und andererseits die Methoden und geschätzten Zahlen kritisch hinterfragt. Die Liste der dort zitierten Literatur möchte ich ergänzen durch den Hinweis auf das Buch „Artensterben. Von der ökologischen Theorie zum Eigenwert der Natur“ von Martin Gorke (erschienen bei Klett-Cotta, Stuttgart 1999). Der Autor nimmt die – sehr uneinheitlichen – ethischen Argumente zur Biodiversität bzw. zu deren Verlust unter die Lupe, setzt das Seziermesser der praktischen (analytischen) Philosophie an. Er deckt Fehlschlüsse sowie Inkonsequenzen auf und plädiert selbst für einen „ethischen Holismus“, welcher der Natur insgesamt einen Eigenwert zuschreibt, im Gegensatz zu anthropozentrischen Begründungen des Artenschutzes und zu einem „Wirbeltier-Chauvinismus“.

Prof. Rainer Schimming, Greifswald

Was soll der Naturschützer eigentlich tun?

Als langjähriger ehemaliger Leiter der für Nord-Württemberg zuständigen Naturschutz-Fachbehörde bedaure ich den bei aller Fülle wissenschaftlicher Gesichtspunkte relativistischen Charakter des Beitrags und den gelegentlich herablassenden Ton gegenüber den Naturschützern. Es ist nun einmal so, dass sich in der harten Alltagsarbeit mit Blütenpflanzen- und Vogelarten bei Bürgermeistern, Landräten, Landwirten, Flurbereinigern usw. weit eher argumentieren lässt als mit Fadenwürmern, Schnecken und Insekten, Großschmetterlinge vielleicht ausgenommen. Was soll der praktische Naturschützer eigentlich tun? Warten, bis Verbreitung, ökologische Ansprüche und Gefährdung aller Arten wissenschaftlich abgeklärt sind? Hätte er dies bisher getan, so wären in unserem Land die meisten bedrohten Lebensräume bereits zerstört!

Dr. Hans Mattern, Schorndorf



JÜRGEN ALBERTI

Die leuchtend roten Farbtupfer der Karthäusernelke (*Dianthus carthusianorium*) waren früher ein üblicher Anblick in den Hohlwegen des Kraichgaus.

OH-Karikaturen und Am Rande – Januar 2002

Spektrum der Wissenschaft lese ich mit großem Interesse. Im Januarheft 2002 vermisse ich sehr die herrlich kritischen Karikaturen von OH sowie die erfrischenden und nachdenkenswerten Bemerkungen Am Rande.

Ich wünsche mir sehr, diese Beiträge in den folgenden Heften wiederzufinden, relativieren sie doch erfreulich unsere täglichen Probleme. Gerade bei „kopflastigen“ Diskussionen sind m. E. hin und wieder Anmerkungen gute Mittel, welche uns den Bezug zum Menschlichen zeigen.

Dr. med. Werner Schmid, Oberboihingen

Anmerkung der Redaktion: *Es tut uns Leid, dass unsere Leser im Januar kein OH-Erlebnis hatten. Wir versprechen, dass so etwas nie wieder vorkommt!*

Tests mit kleinen Fehlern – Januar 2002

Ich bin bestürzt ob der Geisteshaltung in diesem Artikel. Mit statistischen Mitteln wird hier wieder einmal Kritik geübt an einem qualitativen Verfahren, das Ärzten und Psychologen Hinweise geben kann auf Fantasien, Erinnerungen und Emotionen des Patienten. Diese sind qualitativ und subjektiv, weil sie auf individuelle Bedeutungskontexte verweisen. Auch Emotionen wie Schmerz, Angst, Lust und Müdigkeit sind qualitative körperliche Empfindungen, die mit keinem technischen oder statistischen Verfahren sichtbar gemacht werden können. Höchstens mit Sprache lassen sich diese unsichtbaren Phänomene, die von Bildern in uns ausgelöst werden können, umschreiben.

In der Sprache der Biosemiotik von Uexküll werden diese subjektiv und körperlich erlebbaren, aber nie objektivierbaren Phänomene „ikonisch“ genannt – nach dem triadischen Zeichenverständnis von Charles Sanders Peirce, in dem ein Sinnesphänomen nie als Zeichen für etwas erlebt werden kann, wenn ihm nicht durch einen lebendigen Interpreten ein Objekt „indexikalisch“ zugewiesen wird. Dies geschieht in einem kontinuierlichen, lebenslangen Zeichenprozess, der im Gedächtnis viele neuronale Netze anlegt, die immer wieder Sinnesphänomene mit Objekterfahrungen verknüpfen, verstärken oder reaktivieren.

Man merkt, dass die Autoren keinerlei Anschluss an die aktuellen Ergebnisse der Neurowissenschaften gefunden haben, so wie sie in Deutschland von Wolf Singer und Gerhard Roth dargestellt werden.

Dr. med. Ludger Albers, Wiesbaden

Menschenfresser in der Altsteinzeit – November 2001

Kann es nicht sein, dass eine der Aussagen über die Anasazi die wahre Situation eventuell verharmlost darstellt? Da heißt es zum Beispiel: „Viele Stellen stammen offenbar aus der Zeit, als die jeweilige Siedlung aufgegeben wurde.“ Nach den Details zu urteilen, halte ich zwei alternative Szenarien für möglich:

a) Im Zuge einer Hungersnot haben die Überlebenden die Toten ihres eigenen Stammes verzehrt.

b) Der Kannibalismus fand im Zuge eines feindlichen Überfalls statt, bei dem alle oder fast alle Bewohner getötet und ein eventueller Rest vertrieben wurden.

Welcher von beiden Fällen vorliegt, sollte sich durch eine statistische Untersuchung einigermaßen zuverlässig klären lassen:

Da Hungersnöte meistens überregional und zweitens in unterschiedlichen Schweregraden auftreten, würde im Fall a) eine Hungersnot gleichzeitig in verschiedenen Siedlungen auftreten und zudem nicht jede Hungersnot zur Aufgabe einer Siedlung führen. Das heißt, man würde Kannibalismus innerhalb einer Siedlung bei verschieden alten Funden feststellen und eventuell auch gleich alte Funde aus benachbarten Siedlungen nachweisen.

Der umgekehrte Fall, wenn also in jeder Siedlung alle Kannibalismusopfer fast gleichzeitig gestorben sind und es keine gleichaltrigen Funde von Nachbarsiedlungen gibt, würde demgegenüber als Nachweis für Fall b) sprechen.

Jörg Michael, Hannover

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Sabotage im Internet – Dezember 2001

Auf den Webserver kommt es an

Zwar beschreibt der Artikel ein durchaus grundsätzliches Problem, geht aber in verschiedenen Punkten klar an der Realität vorbei: Zum einen sind hauptsächlich die äußerst fehlerhaften und anfälligen Produkte eines Redmonder Monopolisten-Konzerns [Microsoft] für die Wurm-Probleme verantwortlich, zum anderen bilden diese letztlich praxisuntauglichen Webserver jener Firma die Minderheit (20 Prozent) der Webserver. Somit ist ein Anti-MS-Wurm gar nicht in der Lage, das Internet zu gefährden, da 60 Prozent aller Webserver Apache-Server sind, die in aller Regel auf soliden UNIX-Systemen wie Solaris und Linux laufen. Webmaster, die IIS verwenden, handeln durch diese schlechte Wahl grob fahrlässig und sind wesentlich mitverantwortlich für solche Probleme.

Stefan Urbat, Stuttgart

Billig, aber unsicher

Warum wird nicht davon geredet, dass sowohl die Softwareindustrie als auch die Unternehmen, die im Internet präsent sind, schlicht Geld dadurch sparen, dass sie bekannte Sicherheitsmaßnahmen nicht umsetzen? Auch Microsoft könnte durchaus sicherere Software herstellen – bloß wäre das viel teurer, wegen längerer Entwicklungszeiten und weil man vielleicht entsprechend ausgebildete Programmierer bräuchte. Auf der anderen Seite wollen viele Anwender das Internet als vermeintlich billiges Kommunikationsmedium nutzen, sparen sich dann aber die Kosten für Spezialisten, die z. B. für regelmäßige Systemwartung, -überwachung und -analyse zuständig wären.

Ganz abgesehen davon drohen die wirklichen Gefahren wahrscheinlich nicht direkt „im Internet“, sondern in den (hoffentlich) geschlossenen Netzwerken öffentlicher und privater Institutionen. Wie sicher sind zum Beispiel Daten, die bei Justizbehörden oder Ministerien verwaltet und verwendet werden, vor Manipulation oder Diebstahl? Welche unabhängige Institution kontrolliert Unternehmen, die mit kritischen Daten umgehen? Wer überwacht diese Netze so, dass sichergestellt werden kann, dass es nicht doch einen eventuellen Datenkanal zum Internet geben kann, über den ein Angreifer Zugriff erhält?

A. Bochmann, Freiburg

Lebensfeindliches All – Dezember 2001

Da wir bislang keinerlei Anzeichen haben, dass die Galaxis Zivilisationen hervorgebracht hat, die zur Kolonierung von fremden Planetensystemen in der Lage sind, gibt es sie offenbar nicht. So lautet sinngemäß das Fermi-Paradoxon. Ich halte es für nicht stichhaltig.



J. HESTER, P. SCOWEN, ARIZONA STATE UNIVERSITY, NASA

Eher feindlich als freundlich sind die Lebensbedingungen im All.

Gab es nicht auch schon früher auf dem Planeten Erde ein „Fermi-Paradoxon“? Bevor im 15. Jahrhundert die Portugiesen begannen, den Seeweg nach Osten entlang der afrikanischen Küste zu erkunden und Kolumbus rein zufällig auf einen unbekannten Kontinent stieß, wusste man im damaligen Europa nichts über die Lebensbedingungen am Äquator, nichts über die Existenz ferner Inseln, Kontinente und Völker – genauso wenig wie wir heute über Planeten und Lebensbedingungen außerhalb unseres Sonnensystems wissen. Umgekehrt ahnten die Ureinwohner der fernen Länder damals nichts von der Existenz der Europäer. Und das, obwohl sie durchaus auch hoch entwickelt waren und schon seefahrerisch große Leistungen vollbracht hatten.

Eine Einstellung im Sinne des Fermi-Paradoxons „Gäbe es noch andere hoch entwickelte Völker auf der Erde, wären wir längst von ihnen besucht worden bzw. hätten wir sie längst entdeckt“ wäre zu jener Zeit ja anscheinend falsch gewesen. Die Lösung des damaligen (scheinbaren) Paradoxons: Die Zeit war für alle Völker der Erde bis dahin noch nicht reif gewesen, um diese Entfernungen in irgendeiner Form überbrücken zu können. Könnte die Lösung des extraterrestrischen Fermi-Paradoxons nicht auch so lauten?

Dr. Wolfgang Priebsch, Kiel

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 91 26-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Daniel Fischer, Dr. Markus Fischer, Dr. Heinz Kredel, Samuel Kredel.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sfr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Gruner&Jahr, Hamburg, Spotlight Verlag, Planegg und Mare, Hamburg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

GENTECHNIK

Naturstoff im Reagenzglas nachgebessert

Ein körpereigener Abwehrstoff, der normalerweise bei Virusinfektionen gebildet wird, hilft Patienten mit Multipler Sklerose. Allerdings ist das viel versprechende Molekül nur schlecht wasserlöslich. Forscher konnten es nun optimieren.

Von Julia Bidder

Unermüdlich kämpft unser Immunsystem gegen Eindringlinge, die es mit einer Vielzahl von Abwehrzellen, Antikörpern sowie antiviralen und antibakteriellen Stoffen attackiert. In seltenen Fällen schießt es dabei allerdings übers Ziel hinaus und wendet sich plötzlich auch gegen körpereigene Strukturen. Die Folge ist eine so genannte Auto-Immunerkrankung.

Auf einer solchen entgleisten Abwehrreaktion beruht auch die Multiple Sklerose, an der allein in Deutschland etwa 120 000 Menschen leiden. Wie ihr Name besagt, äußert sie sich durch Entzündungen an mehreren („multiplen“) Stellen im Nervensystem, bei denen die Infektionsherde schließlich vernarben („sklerotisieren“). Angriffsziel des Immunsystems ist dabei die Myelinhülle der Nervenfasern in Gehirn und Rückenmark. Nimmt diese isolierende Schutzschicht Schaden, wird die Weiterleitung von Nervensignalen beeinträchtigt. Die Patienten leiden deshalb unter bleierner Müdigkeit, Sehstörungen und zunehmenden Lähmungen.

Die Krankheit verläuft oft in Schüben, heilen lässt sie sich nicht. Bislang stehen nur wenige Medikamente zur Verfügung, die den Verlauf mildern oder das Intervall zwischen zwei Schüben verlängern können. Beta-Interferon ist eines davon. Es wurde 1957 entdeckt und gehört zusammen mit Alpha- und Gamma-Interferon zu einer besonderen Klasse körpereigener Stoffe. Bei Bedarf gebildet, verstärken sie die Immunreaktion, während sie die Körperzellen zugleich gegen virale Angriffe wappnen. Beta-Interferon mindert aber auch die Aktivität genau derjenigen menschlichen Abwehrzellen, die zur Zerstörung der Nervenhüllen beitragen. Seit nunmehr acht Jahren dient es deshalb als Therapeutikum bei Multipler Sklerose.

Der Wirkstoff wird mit Hilfe gentechnischer Methoden in Bakterien oder Säugerzellen hergestellt und den Patienten meist in die Muskeln oder unter die Haut gespritzt. Beta-Interferon ist allerdings sehr schlecht wasserlöslich. Ein Großteil der verabreichten Moleküle gelangt daher gar nicht erst in die Blutbahn, sondern bleibt an der Einstichstelle hängen und zerstört dort Hautzellen.

Forscher um Bernd Otto am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik in Hannover unternahmen deshalb den Versuch, das natürliche Molekül künstlich so abzuwandeln, dass es sich besser in Wasser löst. Das Vorbild lieferte eine schwedische Arbeitsgruppe, der schon 1994 bei Viruspartikeln eine ähnliche Modifikation gelungen war.

Die grundlegende Idee ist einfach: Man tauscht Wasser abweisende (hydrophobe) Bestandteile (Aminosäuren) an der Oberfläche des Proteins gegen Wasser liebende (hydrophile) aus. Allerdings setzt dies voraus, dass die genaue Anordnung der einzelnen Bausteine im Molekül bekannt ist. Das war zu Projektbeginn jedoch nicht der Fall. Zwar hatten Molekularbiologen die Abfolge der Aminosäuren in der Proteinkette des Beta-Interferons ermittelt, sodass sich sagen ließ, an welcher Stelle in der Sequenz überall ein hydrophober Baustein auftritt. Allerdings fehlten Informationen darüber, wie sich die Kette zum dreidimensionalen Molekül verknäult („faltet“) und welche Wasser abweisenden Aminosäuren in diesem Knäuel nach außen ragen.

Jonglieren mit Bausteinen

Zum Glück war immerhin die Raumstruktur des Interferons der Maus aufgeklärt. Dessen Aminosäuresequenz stimmt zur Hälfte mit der des menschlichen Moleküls überein. Anhand dieser Ähnlichkeiten und der bekannten dreidimensionalen Struktur des Maus-Proteins errechneten die Forscher um Otto den räumlichen Aufbau des Human-Interferons. In dem so abgeleiteten Strukturmodell konnten sie dann insgesamt zehn hydrophobe Aminosäuren identifizieren, die nach außen ragten und so weit entfernt von möglichen Bindungsstellen des Moleküls lagen, dass sie die biologische Wirkung vermutlich nicht beeinflussten. Inzwischen ist die Kristallstruktur des Beta-Interferons bekannt; nachträglich

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR GRENZFLÄCHEN- UND BIOVERFAHRENSTECHNIK

Bei einem gentechnisch maßgeschneiderten Interferon (rechts) sind gegenüber dem natürlichen Protein (links) an den durch Pfeile markierten Stellen hydrophobe Aminosäuren (blau) durch hydrophile, also Wasser liebende (rot) ersetzt worden. Tatsächlich erhöhte sich die Wasserlöslichkeit des Moleküls dadurch um den Faktor zehn.

Nachgehakt

Kein KO-Sieg für Knockout-Ferkel

Schweine als Organspender für den Menschen? Trotz der jüngsten Erfolgsmeldung ist der Weg dahin noch weit.

Rund einmal in der Woche macht ein Thema aus dem Bereich der Biotechnologie (im weitesten Sinne) Schlagzeilen, und der erste Hit dieses Jahres waren die genmanipulierten Ferkel mit den menschenfreundlichen Organen – frisch aus dem Stall des inzwischen von Arthrose geplagten Genschafs Dolly. Mancher spürte im Geiste schon ein Schweineherz in seiner Brust schlagen. Doch so weit sind wir noch lange nicht. Es stimmt, dass die Möglichkeit der Transplantation von schweinischen Organen auf menschliche Empfänger das langfristige Ziel dieser Forschungsarbeiten ist. Doch auf dem Weg dahin wurde jetzt nur das allererste von sehr vielen Hindernissen ein bisschen zur Seite geschoben – nicht einmal ganz ausgeräumt.

Es handelt sich um ein Enzym, das eine bestimmte Art von Zuckermolekül an die Membranproteine des Schweins anklebt. Die süßen Anhängsel ragen dann wie Wimpel aus der Oberfläche der Zelle heraus. Beim Versuch, ein normales Schweine-Organ zu transplantieren, würde das menschliche Immunsystem alle Schweinezellen anhand dieses Zuckers sofort als fremd erkennen und systematisch bekämpfen. Innerhalb von Minuten wäre das Transplantat abgetötet.

Die Forscher bei der Firma PPL Therapeutics in Edinburgh und eine amerikanische Arbeitsgruppe haben nun unabhängig voneinander Ferkel geschaffen, denen eine Ausfertigung des Gens fehlt, das für die Präsentation dieses Zuckers notwendig ist. Da die Chromosomen der Schweine jedoch ebenso wie unsere paarweise auftreten, verbleibt den Schweinchen noch die zweite Version.

Im nächsten Schritt müssen die Forscher also den zu Weihnachten geworfenen weiblichen Ferkeln zu ebenso inaktivierten männlichen Spielgefährten verhelfen. Wenn beide sich dann ganz naturgemäß paaren, trägt nach Gregor Mendel statistisch ein Viertel des Nachwuchses das störende Gen überhaupt nicht mehr. Erst diese Ferkel wären echte Knockout-Schweine, wie Genetiker mit ihrem Sinn für makabren Humor Tiere nennen, bei denen sie einen Erbfaktor erfolgreich außer Gefecht gesetzt haben.

Bis dieser Schritt gelingt, kann niemand wissen, ob Schweine ohne den Oberflächen-Zucker überhaupt überlebensfähig sind. Mäuse brauchen ihn nicht, aber das ist noch lange keine Garantie dafür, dass auch Schweine ohne ihn auskommen. Und selbst wenn er sich als entbehrlich erweist, müssen erst noch Tierversuche mit Affen erweisen, ob die vom Zucker befreiten Schweineorgane wirklich weniger stark abgestoßen werden. Es wäre gut denkbar, dass sich hinter diesem größten Hindernis einige weitere verbergen. Zum Beispiel könnten andere feine Unterschiede zwischen den Zellen von Schwein und Mensch zur Abstoßung nicht nach Minuten, sondern erst nach Stunden oder Tagen führen. Für die Transplantationshoffnungen wäre das ebenso katastrophal.

Selbst wenn alle diese Hindernisse eines Tages wegkloniert und die Schweine immer noch überlebens- und zuchtfähig wären, bliebe ein weiteres Risiko: dass zusammen mit den Organen Viren transplantiert werden, die im Erbgut der Tiere versteckt sind und auf diesem Weg die Artenbarriere überspringen könnten. Folglich bräuchte man noch eine Methode, diese Gefahr hundertprozentig auszuschließen. Allgemein müssten Spenderschweine wesentlich strikteren Gesundheitskontrollen unterliegen als Tiere, die wir lediglich aufessen.

Waren die vorweihnachtlichen Klonferkel also ein Meilenstein? Wohl eher nicht. Sie markieren nur den ersten Schritt auf einer weiten Reise. Geben wir den Forschern noch zehn Jahre, vielleicht können sie dann mit transplantierbaren Organen aus Schweinen aufwarten.

Michael Groß
www.michaelgross.co.uk

zeigt sich, dass das errechnete Modell der Realität schon sehr nahe kam.

Durch gezielte Mutationen tauschten die Forscher dann jeweils einen der zehn hydrophoben Bausteine (Leucin oder Phenylalanin) gegen die Wasser liebende Aminosäure Serin aus. Dazu schleusten sie die künstlich veränderten Gene mit der gewünschten Erbinformation in Bakterienzellen ein, die daraufhin das zugehörige Protein produzierten. Dieses prüften die Forscher jeweils auf Wasserlöslichkeit und biologische Wirksamkeit. Dabei zeigte sich, dass acht der gewählten Aminosäuren ersetzt werden konnten, ohne die Wirksamkeit des Interferons zu beeinträchtigen. Interessanterweise spielte es keine Rolle, ob nur eine Aminosäure ausgetauscht wurde oder gleich alle acht. Doch die Oberflächen-Eigenschaften des Moleküls änderten sich durch den Transfer drastisch: Seine Löslichkeit stieg auf das Zehnfache.

Jüngst gelang es den Fraunhofer-Forschern, das veränderte Beta-Interferon auch in Säugetierzellkulturen zu produzieren, die sie aus den Eierstöcken chinesischer Hamster gewonnen hatten. Derart hergestelltes Beta-Interferon bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber dem bakteriell erzeugten Protein: Im Gegensatz zu diesem ist es glykosyliert, trägt also auf seiner Oberfläche eine Reihe von Zuckerketten. Das macht es noch einmal um den Faktor zehn löslicher. Das veränderte Moleküldesign und die Produktion in Säugerzellen steigern zusammen also die Löslichkeit gegenüber unverändertem Beta-Interferon aus Bakterienzellen um den Faktor hundert. In Tierversuchen erreichte der Wirkstoff im Blut ebenfalls eine höhere Konzentration. Zudem wurde er nicht so schnell abgebaut wie das natürlich vorkommende Molekül.

Das maßgeschneiderte Protein muss sich nun in klinischen Tests am Menschen bewähren. Seine Einsatzmöglichkeiten beschränken sich dabei keineswegs auf die Multiple Sklerose. Denn es hilft zugleich gegen Virusinfektionen und hemmt die Teilung von Tumorzellen. Daher hoffen die Forscher, damit auch erfolgreich Krebs oder Hepatitis bekämpfen zu können. Sie haben ihr optimiertes Beta-Interferon inzwischen weltweit zum Patent angemeldet. Für Deutschland wurde das Patent bereits erteilt.

Julia Bidder *ist Diplom-Biologin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Saarbrücken.*

GRAVITATIONSWELLEN

Lazarus und das große Fressen

Erstmals ist es gelungen, die Abstrahlung von Gravitationswellen bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher am Computer zu simulieren. Das Ergebnis dieses „Lazarus-Projektes“ hilft, die Spuren solcher Ereignisse im All zu entdecken.

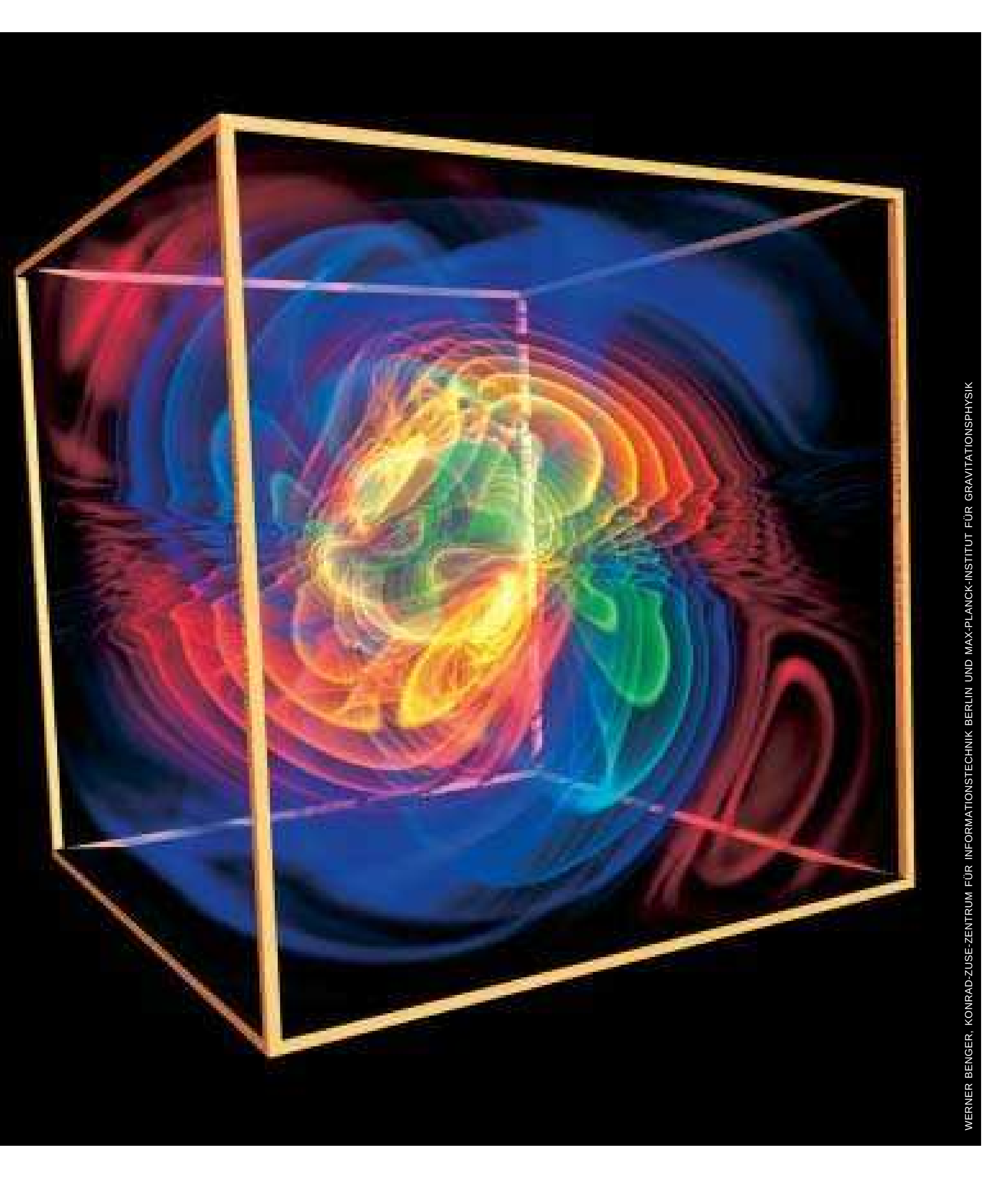
Von Markus Pössel

Fast neunzig Jahre ist es her, dass Albert Einstein die Existenz von Gravitationswellen postulierte – Störungen in der Geometrie des Raumes, die sich ähnlich wie elektromagnetische Strahlung wellenförmig ausbreiten. Sie ergeben sich aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, welche die Gravitation auf geometrische Eigenschaften von Raum und Zeit zurückführt. Bislang ließ sich Einsteins Vorhersage nur indirekt bestätigen, doch das könnte sich schon bald ändern: Gleich mehrere internationale Forschergruppen sind dieser Tage dabei, hochempfindliche Gravitationswellendetektoren in Betrieb zu nehmen, mit denen ein direkter Nachweis gelingen soll (siehe das Interview auf Seite 24).

Um die bei solchen Messungen gewonnenen Daten interpretieren und Rückschlüsse auf die Quelle der aufgefangenen Signale ziehen zu können, ist allerdings ein gutes theoretisches Verständnis der kosmischen Prozesse nötig, bei denen Gravitationswellen entstehen. Hier hat eine Gruppe junger Forscher am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Golm bei Potsdam jetzt einen Durchbruch geschafft. Sie konnte berechnen, was für Gravitationswellen abgestrahlt werden, wenn zwei Schwarze Löcher einander umkreisen und dann miteinander verschmelzen.

Schwarze Löcher sind exotische Gebilde, die sich gleichfalls aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ableiten lassen. Darin ist Masse auf so engem Raum konzentriert, dass wegen der enormen Schwerkraftwirkung noch nicht einmal Licht aus ihrem Inneren entkommen kann. Solche gefräßigen Monster sollten beispielsweise entstehen, wenn massereiche Sterne am Ende ihres Lebens in sich zusammenstürzen. Bei der Verschmelzung zweier umeinander rotierender Schwarzer Löcher werden laut Theorie besonders intensive Gravitationswellen ausgesandt. Diese dürften daher mit einiger Wahrscheinlichkeit zu den ersten Signalen gehören, die sich mit vorhandenen erdgebundenen Detektoren aufspüren lassen.

Kollision und Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher samt der dabei ausgesandten Gravitationswellen zu beschreiben, mag auf den ersten Blick nicht allzu schwer erscheinen, sind doch die zu Grunde liegenden Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie wohlbekannt. Doch von der Kenntnis der Grundgleichungen bis zur zufrieden stellenden Beschreibung realistischer Situationen ist es



WERNER BENGER, KONRAD-ZUSE-ZENTRUM FÜR INFORMATIONSTECHNIK BERLIN UND MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK

Das Endergebnis einer vollständigen numerischen Simulation mit dem Programmpaket „Cactus“ zeigt die Raumverzerrung in der unmittelbaren Nachbarschaft zweier Schwarzer Löcher, die gerade miteinander verschmolzen sind. Der äußere Rahmen markiert die Grenzen des Simulationsraums. Die Farben im Inneren illustrieren die Form der entstandenen Gravitationswelle: Wellenberge erscheinen in Rot, -täler in Blau. Der besseren Übersichtlichkeit halber ist nur ausgewählten Punkten eine Farbe zugeordnet; der sich daraus ergebenden Zwiebelschalenstruktur kommt keine physikalische Bedeutung zu.

 (Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

in der Physik oft ein weiter Weg. Das zeigt sich schon bei verhältnismäßig einfachen Theorien wie der newtonschen Mechanik: Zwar kann man eine allgemein gültige Formel dafür angeben, wie sich zwei punktförmige Massen unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen newtonschen Schwereanziehung bewegen (dies ist das so genannte Zweikörperproblem). Doch schon für das Verhalten dreier solcher Körper gibt es keine exakte Lösung mehr, die sich explizit als mathematischer Ausdruck angeben ließe.

Nun sind die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie noch sehr viel komplizierter. Dementsprechend kann man zwar das Gravitationsfeld um einen einzelnen kugelförmigen Körper präzise beschreiben; schon die Lösung eines Zweikörperproblems, wie es zwei einander umkreisende und dann miteinander verschmelzende Schwarze Löcher darstellen, lässt sich aber nicht mehr explizit angeben. Immerhin kennen Physiker und Mathematiker eine Reihe von rechnerischen Tricks, solchen nicht exakt lösbaren Gleichungen dennoch zu Leibe zu rücken.

Annäherung in winzig kleinen Schritten

Einer besteht darin, physikalische Vorgänge mit Computerhilfe möglichst vollständig zu simulieren. Die Mechanik liefert ein anschauliches Beispiel: Das Verhalten dreier Körper im gemeinsamen newtonschen Schwerefeld lässt sich verfolgen, indem man den Zeitablauf in kleine, diskrete Schritte unterteilt. Nach jedem dieser Schritte hat sich jedes Objekt ein Stückchen fortbewegt – umso weiter, je größer seine Geschwindigkeit ist. Sobald alle neuen Positionen ermittelt sind, rechnet der Computer dann für jeden Körper aus, welche Schwerkraft die anderen beiden Massen nun auf ihn ausüben, und passt seine Geschwindigkeit entsprechend an. Auf diese Weise ergeben sich, ausgehend von einer bestimmten Anfangssituation, Schritt für Schritt die gesuchten Bahnen der drei Objekte.

Auch bei der Allgemeinen Relativitätstheorie sind solche numerischen Simulationen möglich, in der Umsetzung allerdings wesentlich aufwendiger. So reicht es nicht aus, die Zeit in diskrete Schritte aufzuteilen. Zusätzlich muss man den Raum in kleine Regionen zerlegen. Nur so kann man beschreiben, wie sich seine Geometrie mit der Zeit ändert. Diese Diskretisierung liefert ein dreidimensionales Gitter mit den Knoten als Raumpunkten. Den einsteinschen Gleichungen folgend berechnet der Computer dann Schritt für Schritt, wie sich die Abstände zwischen ▶

diesen diskreten Raumpunkten mit der Zeit verändern.

In dieser Weise lassen sich die Phänomene der Allgemeinen Relativitätstheorie simulieren. Gravitationswellen pflanzen sich beispielsweise als kleine Veränderungen der Abstände zwischen den Knoten durch das Gitter fort.

Noch schwieriger wird die Simulation bei Schwarzen Löchern. In deren Kern lauert eine so genannte Raumzeitsingularität, ein Gebiet unendlich starker Raumkrümmung. Objekte, die in das Schwarze Loch gefallen sind, werden unerbittlich weiter nach innen gezogen und bei Annäherung an die Singularität von den dort herrschenden starken Kräften zerrissen.

Den Gitterpunkten der Simulationsprogramme ergeht es kaum anders: Der kosmische Leviathan verschlingt immer mehr von ihnen. Die enormen Kräfte in seinem Inneren äußern sich in gewaltigen Änderungen der Geometrie von Raumpunkt zu Raumpunkt, die sich auf dem Gitter nur noch sehr ungenau nachvollziehen lassen. Dadurch entfernt sich die Modellierung mit der Zeit immer weiter von der physikalischen Wirklichkeit. Die heutzutage durchführbaren Simulationen werden auf diese Weise „instabil", bevor die dynamische Entwicklung ein Stadium erreicht hat, in dem sich die Eigenschaften der auslaufenden Gravitationswellen sicher bestimmen lassen.

Raffinierter Umgang mit Störungen

Ein anderer Trick, nicht exakt lösbaren Gleichungen zumindest einiges an physikalischer Information zu entlocken, ist die so genannte Störungsrechnung. Wiederum liefert die newtonsche Mechanik ein Beispiel: Die Gravitationswirkung der Sonne auf die Planeten ist ungleich größer als deren gegenseitige Schwereanziehung. Daher lässt sich das schwierige Vielkörperproblem „Sonnensystem" in guter Näherung lösen, indem man zunächst so verfährt, als spüre jeder der Planeten nur die Schwerkraft des Zentralgestirns (jeweils ein exakt lösbares Zweikörperproblem für Sonne und Trabant). Erst dann bringt man systematisch Korrekturen an, welche die gegenseitige Beeinflussung der Planeten als kleine Störungen berücksichtigen.

Dieser Kunstgriff – einem exakt lösbaren Problem systematisch kleine Störungen hinzuzufügen – lässt sich auch im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie anwenden. So gelingt es damit beispielsweise, ein rotierendes asymmetrisches Schwarzes Loch zu beschreiben, das schwache Gravitationswellen aussendet. Dabei geht man zunächst von einem axialsymmetrischen Exemplar aus, dessen Einfluss auf die Raumzeit in der Umgebung mit exakt lösbaren Gleichungen erfassbar ist. Durch Störungsrechnung kann man dann ermitteln, wie sich Abweichungen von der perfekten Symmetrie dynamisch entwickeln – und wie sich das Schwarze Loch der Verformungen entledigt, indem es Gravitationswellen abstrahlt. Dabei ergeben sich zwar wiederum Gleichungen, die zu kompliziert sind, um explizit lösbar zu sein. Doch ist ihre numerische Auswertung ungleich einfacher als eine vollständige Simulation des gesamten Problems am Computer.

Ein cleverer Ausweg

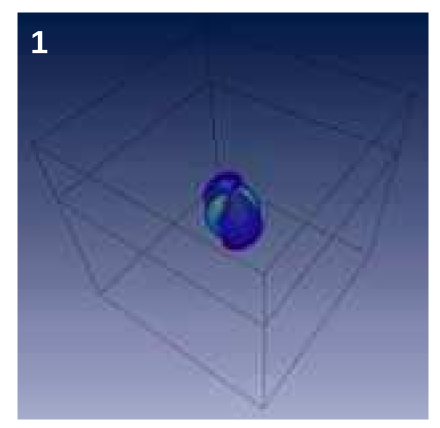
Helfen diese Kunstgriffe, auch das gewaltsame Verschmelzen umeinander rotierender Schwarzer Löcher rechnerisch in den Griff zu bekommen? Auf den ersten Blick lautet die Antwort „nein". Vollständige Simulationen scheitern an den beschriebenen Instabilitäten, und die „heiße Phase" der Verschmelzung unterscheidet sich zu sehr von den bekannten exakten Lösungen, als dass sich die Störungsrechnung sinnvoll anwenden ließe.

Doch die Wissenschaftler in Golm fanden einen cleveren Ausweg. Er besteht darin, die beiden Verfahren in geschickter Weise zu kombinieren: Die akute Verschmelzungsphase umeinander kreisender Schwarzer Löcher wird durch vollständige Computersimulation berechnet. Das gelingt mit dem am Albert-Einstein-Institut entwickelten Programmpaket „Cactus".

Wenn sich Instabilitäten in der Simulation bemerkbar machen, ist durch die Verschmelzung bereits ein einziges, unregelmäßig geformtes Schwarzes Loch entstanden. Dieses wird nun als symmetrisches, rotierendes Objekt behandelt – mit Verformungen, die sich durch Störungsrechnung berücksichtigen lassen. So kann man verfolgen, wie das noch unrunde Verschmelzungsprodukt unter Abstrahlung von Gravitationswellen in ein fast symmetrisches Gebilde übergeht. Der im Rahmen der vollständigen Computersimulation zum Scheitern verurteilte Versuch, das Schicksal der kollidierenden Schwarzen Löcher zu verfolgen, lässt sich dank der Störungstheorie „wiederbeleben". In Anlehnung an den biblischen Lazarus, den Jesus von den Toten erweckte, erhielt das Golmer Unternehmen deshalb den Namen Lazarus-Projekt.

Seine bisherigen Resultate dürften all jene erfreuen, die mit erdgebundenen Detektoren in den nächsten Jahren nach Gravitationswellen fahnden wollen (siehe nachfolgendes Interview). Zum ei- ▶

Simulation der Entstehung von Gravitationswellen



Welche Gravitationswellen ein durch Verschmelzung entstandenes Schwarzes Loch aussendet, lässt sich durch Störungsrechnung ermitteln. Ausgehend von dem Bild links ist hier die berechnete zeitliche Entwicklung der Wellenabstrahlung dargestellt. Der betrachtete würfelförmige Ausschnitt des Raums besteht jeweils aus 48000 diskreten Punkten und umfasst einen viel größeren Bereich als in der Simulation der Verschmelzung mit dem Programmpaket „Cactus“. Die Raumverzerrung nimmt von Rot nach Blau ab. Wie ab dem dritten Bild deutlich zu sehen ist, wurden die Verzerrungsdaten im oberen Drittel des Raumwürfels ausgeblendet, um Einblicke ins Innere der kugelförmigen Wellenzone zu erlauben. Das macht die charakteristische Spiralstruktur der Gravitationsstrahlung sichtbar, die sich aus der Rotation des Schwarzen Loches ergibt. Nachdem ein Puls starker Raumverzerrung nach außen gelaufen ist, kehrt im Zentrum wieder Ruhe ein (ab Bild 6). Die Dauer der Abstrahlung hängt von der Gesamtmasse der beiden kollidierten Schwarzen Löcher ab; für typische Werte von zwanzig bis dreißig Sonnenmassen vergehen zwischen dem ersten und dem letzten Bild nur einige hundertstel Sekunden.

2 3 4 5 6 7

WERNER BENGER, KONRAD-ZUSE-ZENTRUM FÜR INFORMATIONSTECHNIK BERLIN UND MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK

nen erhalten sie wichtige Anhaltspunkte, auf welche Art von Signal sie in den Detektordaten achten sollten. Zum anderen hat sich gezeigt, dass bei einer typischen Kollision anscheinend mehr Energie in Form von Gravitationswellen frei wird als bislang angenommen: Für die Verschmelzungsphase kann mit gigantischen 10^{49} Watt Strahlungsleistung gerechnet werden, dem 10^{23}-fachen dessen, was die Sonne insgesamt in Form elektromagnetischer Wellen abgibt. Über drei Prozent der Masse der Schwarzen Löcher wird dabei gemäß Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ in Energie umgesetzt. Das lässt die Chancen, diese Gravitationswellen hier auf der Erde nachzuweisen, deutlich steigen.

Die Forscher der Lazarus-Gruppe arbeiten jetzt daran, ihr Verfahren zu verfeinern. Außerdem wollen sie es um eine neue Näherungsmethode erweitern, die das gegenseitige Umkreisen der Schwarzen Löcher vor der Verschmelzung beschreiben soll. Und einem Augenblick sehen sie mit fiebernder Erwartung entgegen: dem hoffentlich nicht allzu fernen Moment, da sie ihre Berechnungen mit den ersten Signalen von Gravitationswellen vergleichen können, die von einem Detektor aufgefangen wurden.

Markus Pössel *promoviert am Albert-Einstein-Institut in Potsdam im Bereich Quantengravitation.*

INTERVIEW

Suche nach Gravitationswellen

Bisher hat die 1916 vollendete Allgemeine Relativitätstheorie, mit der Albert Einstein die Beschreibung der Gravitation auf eine neue Grundlage stellte, alle Tests mit großem Erfolg bestanden. Schon 1919 wurde bei zwei Sonnenfinsternis-Expeditionen die Vorhersage der Ablenkung des Lichtes von Sternen beim Vorbeigang an der Sonne grob bestätigt, nach 1969 dann sehr viel genauer durch radiointerferometrische Messungen an weit entfernten Quasaren. Die im Rahmen der newtonschen Gravitationstheorie nicht ganz erklärbare Drehung des Perihels (sonnennächsten Punktes) der Merkurbahn – es gibt dort eine Abweichung von 43,11 Bogensekunden pro Jahrhundert – lässt sich ebenfalls auf der Grundlage der Relativitätstheorie verstehen. Schließlich stimmt die Rotverschiebung von Spektrallinien in Gravitationsfeldern mit der Vorhersage überein – das zeigen Messungen von Emissionslinien im Sonnenspektrum und Experimente mit Atomuhren in Flugzeugen.

Dagegen ließ sich die Voraussage, dass Massen im astronomischen Maßstab Gravitationswellen aussenden können, wenn sie in starken Feldern beschleunigt werden, bisher nur indirekt durch Präzisionsmessungen an einem Doppelpulsar bestätigen. Russell Hulse und Joseph Taylor entdeckten diese periodische Radioquelle 1974 und untersuchten sie über mehrere Jahre hinweg. Dabei stellten sie fest, dass sich die Umlaufbahn in diesem Binärsystem verkleinert und die Umlaufperiode um 75,6 millionstel Sekunden im Jahr abnimmt – sehr wahrscheinlich durch die Abstrahlung von Gravitationswellen.

Der direkte Nachweis solcher Schwerkraftwellen – analog zum Empfang von Radiowellen – ist bisher aber noch nicht gelungen. Die größten Chancen dazu bietet die extrem genaue interferometrische Messung der Abstandsänderung zweier Testmassen unter dem Einfluss von Gravitationswellen. Ende letzten Jahres hat ein entsprechendes Gerät in Europa – GEO600 (mit 600 Metern Armlänge) in Ruthe bei Hannover – den Probemessbetrieb begonnen. Bald darauf wurde es zu einer gemeinsamen Messkampagne mit dem amerikanischen LIGO-System zusammengeschaltet. Dieses ist wesentlich größer und teurer (zwei Interferometer mit vier Kilometern Armlänge und ein halb so langes), hat aber nicht ganz so hoch entwickelte optische Komponenten wie GEO600. Das italienisch-französische Gerät VIRGO mit drei Kilometern Armlänge wird erst in etwa zwei Jahren betriebsbereit sein. Das folgende Gespräch mit Karsten Danzmann – dem Leiter von GEO600 – beschreibt die mittelfristigen Perspektiven dieser Forschungen.

„Das ist ein ständiger Kampf“

Das Ziel, Gravitationswellen direkt nachzuweisen, ist jetzt in greifbare Nähe gerückt: Die Gravitationswellen-Interferometer GEO600 bei Hannover und LIGO in den USA haben vor kurzem den Messbetrieb aufgenommen. Zu den Erwartungen äußert sich Prof. Karsten Danzmann.



MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / UNIVERSITÄT HANNOVER

Karsten Danzmann leitet die Abteilung Gravitationswellen-Astronomie des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik und der Universität Hannover.

Spektrum: *Welche der möglichen Quellen von Gravitationswellen werden mit dem Laserinterferometer GEO600 am leichtesten nachweisbar sein?*

Karsten Danzmann: Es wäre schön, wenn wir das jetzt schon wüssten – wenn Sie in einigen Jahren wieder fragen, kann ich Ihnen das genau sagen. Wir haben einige Ideen: Es gibt Standardquellen, an denen man sich orientiert und auf die hin man den Detektor zu optimieren versucht. Diese Quellen können wir berechnen – das heißt aber nicht, dass es auch diejenigen sind, die die Natur uns liefert. Es kann sogar sein, dass es noch viel schönere gibt; denn unser bisheriges Wissen über das Universum ist auf elektromagnetische Beobachtungen beschränkt. Andere Quellen, die bevorzugt Gravitationswellen aussenden, können wir gar nicht vorhersagen, weil sie sich im elektromagnetischen Spektrum nicht zeigen. Insofern hat jeder von uns seine Lieblingsquelle, von der er denkt, das werde die erste sein.

Spektrum: *Was ist Ihre Lieblingsquelle?*

Danzmann: Doppelsternsysteme aus zwei kleinen Schwarzen Löchern, die miteinander verschmelzen. Denkbar wäre aber auch eine monochromatische Quelle, etwa ein rotierender Neutronenstern wie der Crab-Pulsar. GEO600 ist so ausgelegt, dass wir ihn gerade noch in unserem Frequenzfenster haben. Der Crab-Pulsar verliert Energie; wenn dahinter die Abstrahlung von Gravitationswellen steckt, können wir das erwartete Signal berechnen. Es wäre mit GEO600 nachweisbar, wenn der gesamte Energieverlust darauf zurückzuführen ist.

Spektrum: *Nun wurden Gravitationswellen beim Hulse-Taylor-Pulsar ja schon indirekt nachgewiesen: Die Abnahme seiner Bahnperiode stimmt innerhalb von 0,3 Prozent mit der Voraussage der Allgemeinen Relativitätstheorie für Gravitationswellen-Abstrahlung überein. Bestehen Chancen, sein Signal mit GEO nachzuweisen?*

Danzmann: Nein. Erst wenn dieses Doppelsternsystem in etwa 300 Millionen Jahren verschmelzen wird, entsteht ganz am Ende der Fusion ein Signal, das in das Frequenzfenster von GEO fällt.

Spektrum: *Wo liegt dieses Fenster?*

Danzmann: Bei Frequenzen von etwa 50 Hertz bis zu einigen Kilohertz.

Spektrum: *Wie weit haben Sie mögliche Störquellen unter Kontrolle?*

Danzmann: Das ist ein ständiger Kampf. Wenn man eine Rauschquelle beseitigt hat, verbessert sich die Empfindlichkeit so weit, dass man der nächsten Rausch-



In zwei solchen evakuierten Rohren messen bei GEO600 Laserstrahlen von Gravitationswellen bewirkte Abstandsänderungen zwischen Testmassen.

quelle aufsitzt und an der arbeitet – man braucht schon sehr viel Geduld. Das seismische Rauschen ist sehr gut verstanden und beherrschbar. Man weiß, wie man Anlagen zur Vibrationsisolation zu bauen hat, es ist nur eine Frage des Aufwandes, den man treiben will. Das so genannte Photonen-Schrotrauschen bei den höheren Frequenzen, das von Quantenfluktuationen des im Interferometer umlaufenden Laserlichts herrührt, verstehen wir auch relativ gut, und moderne Methoden der Quantenoptik sollten in fünf bis zehn Jahren noch einige Fortschritte bringen. Es scheint hier zumindest keine fundamentalen Grenzen zu geben. Das thermische Rauschen im mittleren Frequenzbereich ist dagegen noch ein Problem. Wir wissen nicht wirklich genau, welche Form es annehmen wird. Diesen Teil der Empfindlichkeitskurve zu ermitteln, macht die größte Mühe – allein deshalb schon, weil Kühlen so schwierig ist.

Spektrum: *Wie kalt müsste die Apparatur denn werden?*

Danzmann: Leider nimmt das thermische Rauschen nicht direkt proportional mit der Temperatur ab, sondern nur mit der Wurzel daraus. Man muss deshalb mindestens die Verflüssigungstemperatur von Helium erreichen, also etwa vier Kelvin. Das ist jedoch nicht so einfach. Normalerweise bringt man beim Kühlen einen Kontaktfinger oder ein Kühlgas an den zu kühlenden Gegenstand. Das geht hier aber nicht, weil die Spiegel völlig isoliert sein müssen. Man kann also nur über Strahlung kühlen, was durch die endliche Spiegelfläche jedoch begrenzt ist. Auf der anderen Seite gibt es auch eine Heizquelle: der für die interferometrische Messung der Abstandsänderung benutzte Laserstrahl selbst.

Spektrum: *Sie wollen nicht nur das Rauschen unterdrücken, sondern umgekehrt auch das Signal durch ein „Signal-Recycling" überhöhen. Funktioniert das schon?*

Danzmann: Das Prinzip haben wir an einem kleineren Interferometer bereits demonstriert. An GEO 600 wird der Mechanismus erst im Sommer installiert.

Spektrum: *Wann kann der wissenschaftliche Messbetrieb beginnen?*

Danzmann: Vielleicht als Weihnachtsgeschenk 2002.

Spektrum: *Werden dann auch die Detektoren LIGO in den USA und VIRGO in Italien schon mit GEO zusammenarbeiten?*

Danzmann: LIGO hat den gleichen Zeitplan wie wir, wird also gleichzeitig mit der Datenaufnahme beginnen. VIRGO dürfte mit ein bis zwei Jahren Verzögerung hinterherkommen.

Spektrum: *Wann könnte also frühestens ein Gravitationswellensignal koinzident – gleichzeitig von GEO und LIGO – nachgewiesen werden?*

Danzmann: Heiligabend 2002.

Spektrum: *Es gibt auch schon Pläne für neue Detektoren wie das europäische Projekt zweiter Generation EURO. Wann ist dort der Baubeginn geplant?*

Danzmann: Vielleicht in zehn Jahren.

Spektrum: *Wann wird mit der Konstruktion des Weltrauminterferometers LISA für den Nachweis niederfrequenter Gravitationswellen begonnen?*

Danzmann: Relativ bald; genau genommen haben wir bereits angefangen. Nach Jahren der Planung und des Sandkastenspielens beginnt bei LISA jetzt echte Technologie- und Hardwareentwicklung. Derzeit laufen 17 Programme, die von der ESA finanziert werden. LISA selbst soll 2011 starten.

Das Interview führte ***Georg Wolschin****, Theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

KATASTROPHENSCHUTZ

Frühwarn-Informations-System für Vulkane

Auch Vulkane wie der Vesuv bei Neapel, die seit Jahrhunderten ruhen, können plötzlich wieder ausbrechen. Europäische Wissenschaftler entwickeln zurzeit ein benutzerfreundliches Frühwarnsystem für solche potenziellen Zeitbomben.

Von Volker J. Dietrich und Lorenz Hurni

Verheerende Vulkanausbrüche mit zahlreichen Todesopfern – wie jüngst die Eruption des Nyiragongo bei Goma in der Demokratischen Republik Kongo (früher Zaire) – hat es in der letzten Zeit nur außerhalb Europas gegeben. Doch das war eher ein Zufall; denn außer Island liegen auch große Teile Süd- und Südosteuropas in geologisch aktiven Zonen. Überbordende städtische Agglomerationen und steigende Touristenzahlen machen sie hochgradig verwundbar durch Vulkanausbrüche und Erdbeben. Die Möglichkeit, eine nahende Katastrophe vorauszusagen, ist deshalb für die Behörden äußerst wichtig.

Doch wie beurteilt man, ob ein ruhender Vulkan erwacht und zu einer Gefahr für die Bevölkerung in der Umgebung wird? Das ist alles andere als leicht. Zum einen gibt es zunächst nur indirekte Anzeichen im Untergrund. Zum anderen muss eine öffentliche Warnung vor einem möglichen Ausbruch wohlüberlegt sein, zieht sie doch Maßnahmen nach sich, die unabsehbare soziale und wirtschaftliche Folgen für die Betroffenen haben können.

Mit diesem Problem befasst sich das 1999 gestartete dreijährige EU-Projekt Geowarn. Dabei nehmen Wissenschaftler aus Griechenland, Italien, Deutschland und der Schweiz beispielhaft zwei schlafende, aber geodynamisch aktive Vulkane mit modernsten Überwachungsmethoden unter die Lupe. Die gewonnenen Daten koppeln sie dann mit Satellitenbeobachtungen und stellen sie in einem räumlichen geografischen Informationssystem dar. Dank einer benutzerfreundlichen Visualisierungstechnologie haben alle wissenschaftlichen Experten von Überwachungs- und Katastrophenorganen via Internet jederzeit Zugang zu diesen Daten. So sollen die Behörden und beteiligten Wissenschaftler die bestehenden Risiken schnell einschätzen und eine wirksame Krisen- und Katastrophenplanung durchführen können.

Tickende Zeitbombe in der Ägäis?

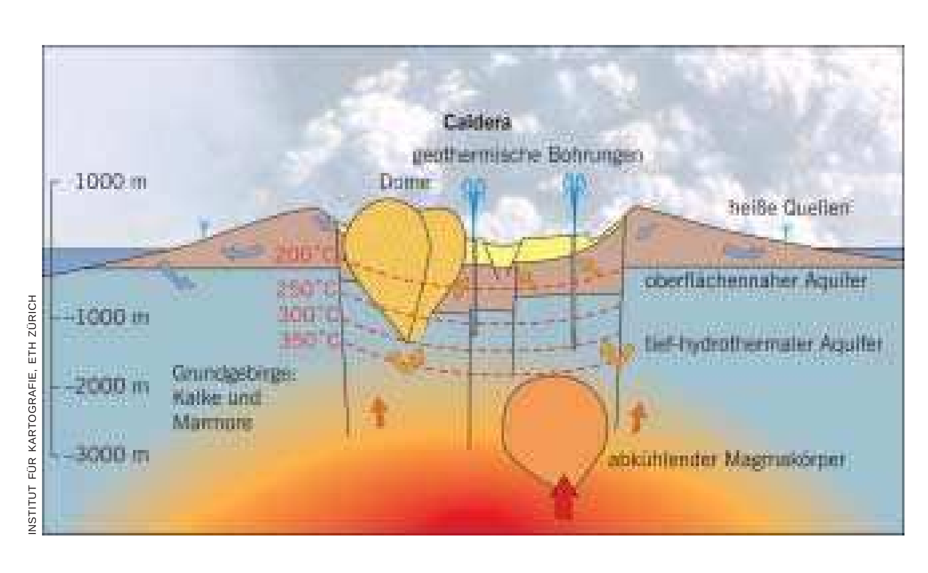
Als ideales natürliches Laboratorium wurde zum einen der Nisyros-Vulkan südlich der Insel Kos in der Ägäis ausgewählt. Vor 160 000 Jahren ereignete sich hier die größte bekannte Vulkanexplosion im östlichen Mittelmeer. Dabei wurden rund 100 Kubikkilometer Bimssteine und Aschen ausgeworfen. Seit mehr als 20 000 Jahren scheint der täglich von hunderten Touristen besuchte Vulkan nun aber erloschen zu sein. Allerdings weisen Bohrungen im großen ehemaligen Einsturzkessel – der Caldera – auf ein aktives unterirdisches „Hydrothermalsystem“ hin: 1500 Meter unter dem Boden zirkulieren bei Temperaturen von 300 Grad Celsius überhitzte Lösungen, Dämpfe und Gase; die Energie dafür liefert die Wärme abkühlender Magmenkörper in mehreren Kilometern Tiefe (Bild unten).

Dass der Vulkan nach wie vor gefährlich ist, zeigte sich in den siebziger und achtziger Jahren des 19. Jahrhunderts. Damals kam es völlig unerwartet zu gewaltigen Wasserdampf- und Gas-Explosionen. Sie ließen in der Caldera kleinere Krater entstehen, aus denen seither heiße Dämpfe und Gase entweichen – Fachleute sprechen von Fumarolen. Zwischen 1996 und 1998 ereigneten sich zudem viele kleinere Beben, die darauf schließen lassen, dass Magma in der Tiefe aufsteigt.

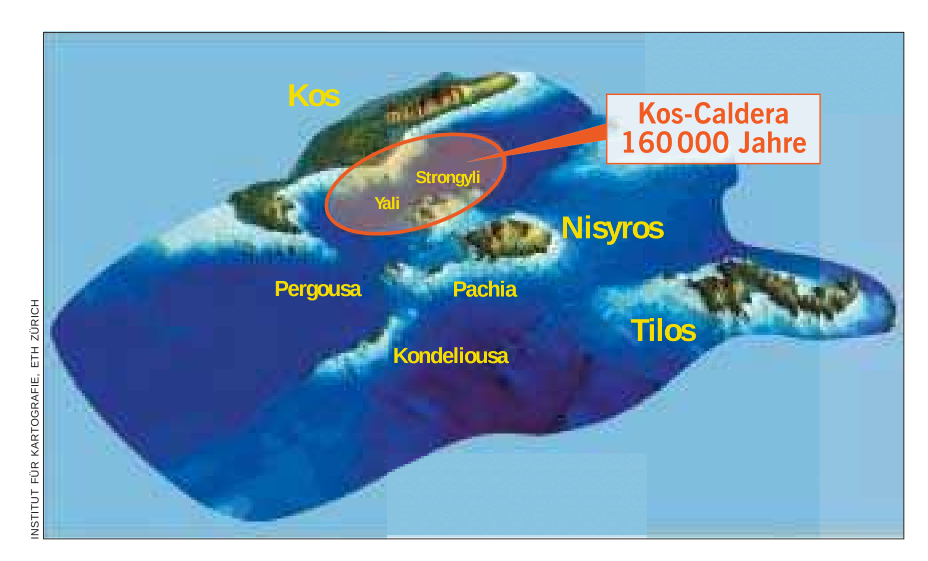
Überwachung per Satellit

Dies macht Nisyros zu einem guten Kandidaten für einen wieder erwachenden Vulkan, dessen kontinuierliche Beobachtung im Rahmen von Geowarn sinnvoll erscheint. Eine herausragende Rolle bei dieser Überwachung spielen Satellitendaten.

So werden mit Hilfe des *Global Positioning System* (GPS), das eine zentimetergenaue Ortsbestimmung erlaubt, Bewegungen der Oberfläche ermittelt. Zudem ermöglichen es die europäischen Satelliten ERS-1 und ERS-2 in Verbindung mit neuester Radar-Interferometrie, den heutigen Zustand der Insel mit dem vor einigen Jahren zu vergleichen. Und mit Landsat-Satellitenbildern lassen sich thermische Oberflächenmodelle des Vulkans und seiner heißen Fumarolenfelder erstellen. Bilder des Satelliten Ikonos erlaubten schließlich, erstmals ein georeferenziertes Ortho-Foto der Insel zu gewinnen: eine verzerrungsfreie Aufnahme mit Kartenqualität, auf der sich für jeden



Die Vulkaninsel Nisyros ist geprägt durch eine zentrale Caldera mit rund 20 000 Jahre alten Lavadomen. Darunter liegen, wie dieser überhöhte schematische Schnitt durch die Insel zeigt, ein aktives Hydrothermalsystem und ein abkühlender Magmakörper, dem aus tieferen Krustenbereichen Wärme und möglicherweise frische Gesteinsschmelze zugeführt werden. Zwei Bohrungen zapfen die Erdwärme an.



Dieses dreidimensionale Gelände- und Meeresbodenmodell des Vulkanfeldes von Kos-Nisyros-Yali-Tilos wurde anhand von Satellitendaten erstellt und hat eine Auflösung von zwanzig Metern. Es ist mit Nordostbeleuchtung dargestellt. Tiefste Meeresböden (700–900 Meter) erscheinen in Dunkelblau, höchste Erhebungen der Inseln (700–850 Meter) in Rotbraun.

Punkt genau die Koordinaten angeben lassen.

Die zweite Gruppe der Überwachungsverfahren besteht aus seismischen, gravimetrischen und magnetischen Messungen. Die Aufzeichnung seismischer Signale gibt einerseits Aufschluss über den Ursprung der registrierten Erdbeben. So lässt sich feststellen, ob die Erschütterungen von Bewegungen an oberflächennahen Bruchflächen herrühren oder mit Vorgängen in Verbindung stehen, die sich in großer Tiefe an Subduktionszonen abspielen, wo eine Platte der Erdkruste unter eine andere abtaucht. Typisch für aufsteigende Magmakörper sind kleinere, unregelmäßig verteilte Erdbebenschwärme mit flachen Herden.

Zum anderen wurden auf dem Meeresboden rund um die Insel Nisyros speziell konstruierte Seismografen installiert, die eine „Durchleuchtung“ des Untergrundes bis in den oberen Erdmantel ermöglichen. Sie liefern so genannte tomografische Ansichten, die zeigen, wie die tief liegenden Magmakörper strukturiert sind (Bild auf Seite 28).

Geochemische Analysen und Temperaturmessungen der heißen Fumarolengase und der Thermalquellen bilden die dritte Gruppe der ständigen Überwachungsmethoden. Im Rahmen von Geowarn werden aber auch Verfahren entwickelt, mit denen sich der Wärmefluss und die Freisetzung von Kohlendioxid und Methan in der Kraterregion ermitteln lassen. Der diffuse Ausstrom solcher Gase ▶



INSTITUT FÜR GEOPHYSIK, UNIVERSITÄT HAMBURG

Mögliche Magmakörper (violett) und Bebenherde (gelb) bis in acht Kilometer Tiefe erscheinen in diesem dreidimensionalen tomografischen Modell des Untergrundes von Nisyros. Es wurde aus den Fortpflanzungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen berechnet, die bei Erdbeben in den Jahren 1997 und 1998 sowie bei künstlich erzeugten Druckluft-Explosionen entstanden.

ist ein wichtiger diagnostischer Parameter, und die dabei freigesetzten Energien liefern Hinweise auf magmatische Veränderungen im Untergrund.

Die von Geowarn gesammelten Daten in Nisyros zeigen insgesamt ein beunruhigendes Bild. Die tomografischen Aufnahmen deuten auf einen aufsteigenden Magmakörper im Untergrund hin. Die Bewegungsmessungen dokumentieren, dass die verschiedenen Blöcke, aus denen die Insel aufgebaut ist, auseinander streben – und zwar unterschiedlich schnell.

Gewisse chemische Parameter lassen außerdem den Schluss zu, dass die Wärmezufuhr im Untergrund zunimmt. So sind etwa die durch Gasanalysen errechneten Gleichgewichts-Temperaturen und Drucke des tief liegenden Hydrothermalsystems in den letzten drei Jahren kontinuierlich angestiegen. Im Stefanos-Krater – der touristischen Hauptattraktion der Insel – werden täglich sechzig bis siebzig Tonnen Kohlendioxid freigesetzt; ihre thermische Leistung von fünfzig bis sechzig Megawatt entspricht der eines Kraftwerks, das den Strombedarf einer mittelgroßen Stadt decken könnte.

Noch ist allerdings nicht sicher, ob der Vulkan tatsächlich am Erwachen ist. Denkbar wäre auch, dass während der seismischen Krise 1997/98 nur eine begrenzte Menge Magma aufgestiegen ist, die das Hydrothermalsystem nun vermehrt mit Wärme und magmatischen Gasen speist. Die Messungen in den kommenden Monaten sollen zeigen, welche der beiden Möglichkeiten zutrifft.

Millionen auf dem Pulverfass

Der zweite Testfall für Geowarn sind die Phlegräischen Felder westlich von Neapel, wo drei Millionen Menschen sprichwörtlich auf einem Pulverfass leben. Auch dort existiert eine Riesencaldera, die vor 30 000 bis 40 000 Jahren durch gewaltige Explosionen entstanden ist. Im Jahre 1159 fand im Solfatara-Vulkan letztmals eine größere Aschenexplosion statt. Ohne markante Vorankündigung tat sich am 28. September 1538 unter der Ortschaft Tripergola drei Kilometer westlich der Solfataren die Erde auf. Nach einer Woche verebbte der Ausbruch; zurück blieb der 140 Meter hohe Kegel des Monte Nuovo.

Heute ist das gesamte Vulkanfeld von ständigen Hebungen und Senkungen geprägt. Von 1969 bis 1972 und von 1982 bis 1984 liefen zwei Hebungsphasen ab, die von starker seismischer Aktivität begleitet waren. Während der zweiten Phase wurde das Gebiet um 1,8 Meter gehoben, und im Solfatara-Krater öffnete sich eine rund siebzig Zentimeter breite Spalte.

Derzeit ist zwar keine erhöhte seismische Aktivität zu beobachten. Allerdings gibt es im Solfatara-Krater eine ausgeprägte fumarolische Tätigkeit. Dabei entweicht täglich die beachtliche Menge von 1500 Tonnen Kohlendioxid; die thermische Leistung ist mit 138 Megawatt fast dreimal so hoch wie bei Nisyros. Die Zusammensetzung und Menge der ausgestoßenen Gase variiert, wie die kontinuierlichen Messungen ergeben haben, annähernd linear mit der seismischen Aktivität. Deshalb könnten die Gasemissionen in Zeiten seismischer Unruhe auf das Doppelte des heutigen Wertes ansteigen.

Bei der Überwachung schlafender Vulkane wird oft versäumt, die einzelnen Parameter, die für sich alleine wenig aussagekräftig sind, zu einem Gesamtbild zu verknüpfen. Geowarn will diesen Fehler vermeiden. Die verschiedenen Messdaten werden deshalb in einem multimedialen Informationssystem zusammengeführt. Es ähnelt demjenigen des interaktiven „Atlas der Schweiz“, der am Institut für Kartografie der ETH Zürich entwickelt worden ist. Diese räumliche Wiedergabe erlaubt es, den genauen zeitlichen Verlauf aller Messdaten übersichtlich darzustellen. So lassen sich etwa Korrelationen zwischen den Oberflächenbewegungen und einem erhöhten Wärmetransport leichter erkennen und auf ihren möglichen diagnostischen Wert überprüfen.

Zusätzlich können anhand der Datensätze Gefährdungskarten erstellt und Katastrophenszenarien simuliert werden, die dann als Grundlage von Risikoanalysen dienen. All das bildet die Basis eines Frühwarnsystems, das die Behörden und die daran beteiligten Wissenschaftler in die Lage versetzt, im Katastrophenfall schnell und effizient zu reagieren.

Volker J. Dietrich *ist Professor für Petrografie und Vulkanologie und* **Lorenz Hurni** *Professor für Kartografie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Weitere Informationen zu Geowarn finden sich unter* ***www.spektrum.de****.*

„E.T.“ im Bernstein

BEIDE AUFNAHMEN: JES RUST, PALÄONTOLOGISCHES INSTITUT IN BONN, THOMAS HÖRNSCHEMEYER, ZOOLOGISCHES INSTITUT IN GÖTTINGEN, UND CHRISTIAN BÖKER, CARL ZEISS



Dieser außerirdisch anmutende „Helm“ (oben) ist der Kopf einer männlichen Schildlaus, die vor vierzig bis fünfzig Millionen Jahren im Harz eines Baumes im Baltikum eingeschlossen wurde (links). Die eingefärbte Großaufnahme offenbart für ein Bernsteinfossil erstaunlich feine Details. So sind die ringförmig angeordneten Knopfaugen und sogar die Muskelbänder im Inneren des ersten Antennengliedes deutlich zu erkennen. Der winzige Kopf selbst misst nicht einmal einen halben Millimeter im Querschnitt. Ermöglicht hat die plastische Wiedergabe ein konfokales Laser-Scanning-Mikroskop. Dabei wurde das Präparat von einem Laser in optischen Schnitten erfasst und das zurückkommende Fluoreszenz- oder Reflexionslicht zu dreidimensionalen Projektionen verarbeitet, die sogar eine Rotation des abgebildeten Objekts erlauben. Jes Rust vom Paläontologischen Institut in Bonn, Thomas Hörnschemeyer vom Zoologischen Institut in Göttingen und Christian Böker von Carl Zeiss in Jena erproben zur Zeit die vielfältigen Möglichkeiten dieser neuen Methode für die Bernsteinforschung.

Das Gas zwischen den Sternen


DON DIXON

Was hier im großen Bild wie lodernde Flammen aussieht, sind mächtige Fontänen aus Gas, die aus der Mittelebene unseres Milchstraßensystems nach beiden Seiten herausschießen, um anschließend zurückzuregnen. Gezeigt ist die Situation entlang eines radialen Querschnitts durch die Galaxis

Das interstellare Medium ist viel interessanter, als die Wissenschaftler einst dachten: Es umhüllt die Sterne und das Milchstraßensystem wie eine Atmosphäre. In einem gewaltigen Kreislauf lässt es aus dem Abfall explodierter Sterne neue Himmelskörper entstehen.

DON DIXON

(kleines Bild links). Noch vor wenigen Jahren verbanden die Astronomen mit dem Begriff „interstellares Medium“ die Vorstellung von kalten, dunklen Wolken aus Gas und Staub, die sich um die Ebene des Milchstraßensystems konzentrieren, ähnlich wie in der Galaxie NGC 891 (kleines Bild rechts).



C. HOWK UND BLAIR SAVAGE / UNIVERSITÄT VON WISCONSIN UND N. SHARP, NOAO

Von Ronald J. Reynolds

Wenn wir den Mond am Himmel anschauen, so mögen die meisten von uns ihn für einen Himmelskörper mit einheitlichen Eigenschaften halten. Doch weit gefehlt. Zwei Punkte auf seiner Oberfläche, die nur einen Schritt auseinander liegen, können so unterschiedliche Temperaturen wie minus 100 und plus 100 Grad Celsius haben. Wir könnten dort direkt neben einem Freund stehen und ihm ins Ohr schreien, doch er würde es nicht hören. Ohne eine Atmosphäre, die Wärme und Schall übertragen könnte, ist jede Stelle auf dem Mond von ihrer Umgebung isoliert – wie eine abgelegene Insel in einem Ozean, auf dem keine Schiffe unterwegs sind.

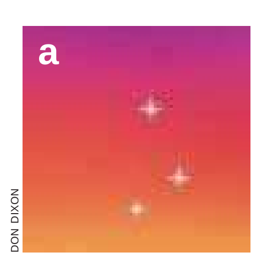
Was die Oberfläche eines Planeten zu einem einheitlichen Ganzen verbindet, ist seine Lufthülle, die Atmosphäre. Sie lässt Umgebungsbedingungen wie die Temperatur sanft variieren. Und lokale Ereignisse können durch sie globale Folgen haben: Ein Asteroideneinschlag, der Ausbruch eines Vulkans oder aus einem Schornstein strömendes Gas wirken sich noch fern vom eigentlichen Ort des Geschehens aus. Diese Eigenschaft von Atmosphären interessiert jetzt auch die Astronomen, die unsere Heimatgalaxie, das Milchstraßensystem, untersuchen.

Schon seit vielen Jahren wissen wir, dass eine extrem dünne „Atmosphäre“, das interstellare Medium, unsere Galaxie einhüllt und den Raum zwischen ihren mehreren Milliarden Sternen erfüllt. Noch bis vor kurzem schien dieses Medium nur ein kaltes, fast bewegungsloses Reservoir zu sein, aus dem irgendwann einmal Sterne kondensieren werden. Doch jetzt haben wir das interstellare Medium als ein stürmisches Gemisch erkannt, dessen Eigenschaften – wie Dichte, Temperatur und Ionisationsgrad – äußerst unterschiedliche Werte aufweisen können: Supernova-Explosionen hinterlassen riesige Leerräume, so genannte Blasen, im interstellaren Medium. An verschiedenen Stellen schießen Gasschwaden wie die Fontäne eines Springbrunnens oder wie Rauch aus einem Schornstein weit aus dem scheibenförmigen Milchstraßensystem heraus. Andernorts fallen Gas- und Staubwolken aus dem intergalaktischen Raum in die Scheibe hinein. Diese und andere Vorgänge verbinden weit entfernte Bereiche unseres Milchstraßensystems, der Galaxis, so wie atmosphärische Phänomene Störungen von einer Seite der Erde zur anderen übertragen.

Die Atmosphäre der Galaxis erweist sich gar als ebenso komplex wie die eines Planeten, wie moderne Beobachtungen zeigen. Sie wird von der Schwerkraft der Sterne und der übrigen Materie festgehalten, von Sternenlicht, energiereichen Teilchen und einem Magnetfeld durchdrungen sowie beständig umgerührt, aufgeheizt, umgewandelt und erneuert. Wie jede Atmosphäre hat sie ihre höchste Dichte „am Boden“ – in diesem Fall in der Ebene, welche die Mitte der galaktischen Scheibe definiert. Hier muss ihr Druck das „Gewicht“ des auf ihr lastenden Mediums ausgleichen. Nahe der galaktischen Ebene verdichtet sich die Materie mancherorts zu Wolken, und in deren dichtesten Bereichen können Sterne regelrecht auskondensieren.

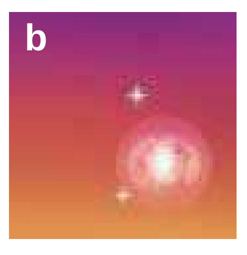
Wie Supernovae „Riesenblasen“ im interstellaren Medium erzeugen

Verschiedene Formen des Wasserstoffs bilden eine komplexe Atmosphäre um die Galaxis

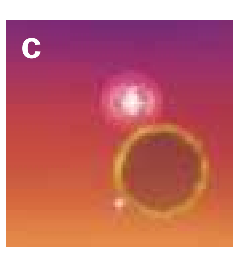


DON DIXON

Die Geschichte einer „Riesenblase“ beginnt mit einem Haufen massereicher Sterne, die im interstellaren Medium eingebettet sind.



Einer dieser Sterne explodiert als Supernova und bildet eine Blase aus heißem Gas, dessen Dichte geringer ist als die in der Umgebung.



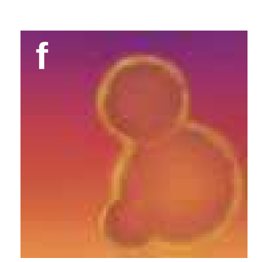
Weil alle massereichen Sterne eine ähnliche Lebenserwartung haben, entsteht bald noch eine Blase.



Die beiden Blasen vereinigen sich. Sternwinde blähen sie weiter auf.



Ein dritter Stern explodiert. Das interstellare Medium wird löchrig wie Schweizer Käse.



Alle drei Blasen haben sich vereinigt: Heißes Gas und Strahlung können sich nun im Innern der Riesenblase frei ausbreiten.

Ein Teil des interstellaren Mediums liegt in Form einzelner Wolken aus atomarem (H I) oder molekularem Wasserstoff (H_2) vor; der überwiegende Rest verteilt sich als ionisiertes (H II) oder atomares Gas. Andere Elemente sind nur in Spuren beigemischt. Die Gesamtmasse des interstellaren Mediums entspricht ungefähr einem Fünftel derjenigen aller Sterne im Milchstraßensystem.

Zusammensetzung der galaktischen Atmosphäre

	in Wolken		zwischen Wolken		
	H_2	H I	warmes H I	warmes H II	heißes H II
Temperatur (Kelvin)	15	120	8000	8000	~ 10^6
Dichte in der Scheibe (cm^{-3})	200	25	0,3	0,15	0,002
Dicke der Schicht (Parsec)	150	200	1000	2000	6000
Volumenanteil (Prozent)	0,1	2	35	20	43
Massenanteil (Prozent)	18	30	30	20	2

Sterne sind Himmelskörper, die durch Verschmelzen von Atomkernen Energie freisetzen. Dabei erzeugen sie aus dem anfänglich vorhandenen Wasserstoff und Helium schwerere Elemente. Haben sie ihren Kernbrennstoff verbraucht, stoßen alle Sterne, die mindestens so massereich sind wie die Sonne, viel von ihrer Materie in das All zurück. Auf diese Weise reichert jede nachfolgende Sterngeneration das interstellare Medium weiter mit schweren Elementen an. Ähnlich wie im Wasserkreislauf auf der Erde folgt einer Kondensation der Materie also eine „Verdunstung". Auf diese Weise wird die Materie in unserer Galaxis immer wieder recycelt.

Ineffiziente Sternentstehung

Fasst man das interstellare Medium tatsächlich als Atmosphäre auf, dann muss man viele der drängendsten Fragen der Astrophysik im Zusammenhang sehen. Da ist zu allererst die Sternentstehung. Zwar sind die Astronomen seit Jahrzehnten mit ihren grundlegenden Prinzipien vertraut, doch ist immer noch unklar, wovon es abhängt, wann und mit welcher Rate Sterne aus dem interstellaren Medium kondensieren. Die Theoretiker beschrieben die Bildung von Sternen lange in Abhängigkeit von den lokalen Bedingungen in einer einzelnen Gaswolke. Heute ziehen sie die Zustände im gesamten Milchstraßensystem heran. Und diese beeinflussen nicht nur die Sternbildung, sie werden auch von ihr durch Rückkopplungseffekte beeinflusst.

Was eine Generation von Sternen in der Galaxis bewirkt, bestimmt wiederum die Bedingungen, in der die nachfolgenden Generationen entstehen, leuchten und vergehen. Diese Rückkopplung zu verstehen, wie die Sterne – vor allem die heißesten und massereichsten – das interstellare Medium großräumig beeinflussen, stellt eine weitere der großen Herausforderungen in der Astrophysik dar. Rückkopplung kann verstärkend oder abschwächend wirken. Einerseits können massereiche Sterne das interstellare Medium aufheizen und ionisieren sowie aus der galaktischen Ebene nach außen treiben. Diese Expansion erhöht den Druck in den Außenbezirken der Galaxis, presst die Wolken zusammen und löst vielleicht deren Kollaps aus, sodass in ihnen eine neue Sterngeneration entstehen kann. Andererseits können Aufheizung und Ionisation die Turbulenz der Wolken verstärken und so die Bildung neuer Sterne unterdrücken. Die Explosion eines massereichen Sterns kann sogar die Wolke auseinander reißen, in der er einst entstand. Eine solche negative Rückkopplung könnte durchaus erklären, warum der Sternentstehungsprozess so ineffizient ist: Üblicherweise enden nämlich nur wenige Prozent der Masse einer kollabierenden Wolke als Sterne.

Ein drittes Rätsel ist, warum Sterne oft in regelrechten Ausbrüchen, so genannten Starbursts, entstehen, die einen größeren Raumbereich umfassen. Im Milchstraßensystem wirken die positiven und negativen Rückkopplungen gerade so zusammen, dass neue Sterne mit gemächlicher Rate entstehen – im Mittel nur etwa zehn pro Jahr. In manchen Galaxien jedoch, wie beispielsweise M 82, überwiegt die positive Rückkopplung. Vor etwa zwanzig bis fünfzig Millionen Jahren sind die Sternbildungsprozesse in den zentralen Bereichen dieser „Starburst"-Galaxie außer Kontrolle geraten und laufen nun zehnmal schneller ab als zuvor. Auch in unserer Galaxis könnte es solche sporadischen Starbursts gegeben haben. Wie sie zu Stande kommen und was sie wieder abschaltet, muss mit dem Beziehungsgeflecht zwischen den Sternen und der dünnen Atmosphäre zusammenhängen, aus der sie kondensieren.

Schließlich diskutieren die Astronomen auch, wie rasch die atmosphärische Aktivität abflauen wird. Die Mehrzahl der Sterne – die weniger Masse als die Sonne haben und mehrere Milliarden Jahren leuchten können – trägt nicht zu dem Materiekreislauf bei. Im Laufe der Zeit wird deshalb immer mehr interstellares Gas in solchen langlebigen Himmelskörpern gebunden. Eines Tages könnte sogar alles Restgas in der Galaxis verbraucht sein. Dann blieben nur noch Sternengreise übrig. Wann es soweit sein wird, hängt davon ab, ob die Galaxis ein abgeschlossenes System ist. Nach neueren Beobachtungen ist sie noch ein offenes System, das Materie mit ihrer kosmischen Umgebung austauscht. Wasserstoffwolken, die bisher kaum mit schweren Elementen angereichert sind, scheinen aus dem intergalaktischen Raum herabzuregnen und unsere Galaxis zu verjüngen. Zugleich könnte sie Gas als schnellen Wind aus ihrer äußeren Atmosphäre abstoßen, so wie die Sonne einen permanenten Strom von Teilchen abbläst.

Um diese Fragen anzugehen, mussten die Astronomen zunächst die chemische Zusammensetzung des interstellaren Mediums bestimmen. Dies gelang bereits in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts anhand der Spektren heller Gasnebel wie beispielsweise des Orionnebels. Gemessen an der Anzahl der Atome macht Wasserstoff neunzig Prozent und Helium zehn Prozent des interstellaren Mediums aus. Alle anderen Elemente – vom Lithium bis zum Uran – tragen insgesamt nur mit etwa 0,1 Prozent bei.

Weil der Wasserstoff dominiert, hängt der Aufbau der galaktischen Atmosphäre im Wesentlichen davon ab, in welcher Form dieses Gas vorliegt. Die frühen Beobachtungen erfassten vor allem die kühleren, neutralen Komponenten. Zum Nachweis dient die berühmteste Spektrallinie der Astronomie: die 1420-Megahertz- oder 21-Zentimeter-Linie, die neutrale Wasserstoffatome ausstrahlen. Beginnend in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts kartierten die Radioastronomen deren Verteilung in der Milchstraße. Der neutrale Wasserstoff – kurz als H I bezeichnet – kommt demnach in Klumpen und Filamenten mit Dichten von 10 bis 100 Atomen pro Kubikzentimeter und Temperaturen nahe ▶

Die Milchstraße mit anderen Augen gesehen

Je nachdem, in welchem Wellenlängenbereich die Astronomen beobachten, erscheint die Milchstraße buchstäblich in einem anderen Licht. Noch vor fünfzig Jahren war nur der sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums zugänglich. In diesen optischen Aufnahmen wurde das interstellare Gas als störend empfunden, weil es den Blick auf die Sterne versperrte. Heute halten die Wissenschaftler das Gas für ebenso wichtig für die Entwicklung der Galaxis wie die Sterne. Diese Ansichten der Milchstraße umfassen einen Streifen von zehn Grad nördlich bis zehn Grad südlich der galaktischen Ebene (siehe auch *http://nvo.gsfc.nasa.gov/mw/mmw_sci.html*).

siehe nächste Doppelseite

STECKBRIEF

Das dünne Gas, das den weiten Raum zwischen den Sternen erfüllt, sahen die Astronomen lange Zeit als Störfaktor an, weil es die Beobachtung dahinter liegender Sterne erschwert.

Heute ist klar, dass das interstellare Gas in vielerlei Hinsicht einer Planeten- oder Sternenatmosphäre ähnelt: Es transportiert Materie von explodierten Sternen und Energie über weite Bereiche der Galaxis und sorgt so für eine beständige Erneuerung des Sterneninventars unseres Milchstraßensystems.

Die Milchstraße mit anderen Augen gesehen

Radiowellen-Bereich
(Frequenz 408 Megahertz)
Zeigt schnelle Elektronen, vor allem an den Orten alter Supernovae

atomarer Wasserstoff
(Frequenz 1420 Megahertz)
Zeigt neutralen, atomaren Wasserstoff in interstellaren Wolken und diffusem Gas

Radiowellen-Bereich
(Frequenz 2,4 – 2,7 Gigahertz)
Zeigt warmes, ionisiertes Gas und Elektronen hoher Energie

molekularer Wasserstoff
(Frequenz 115 Gigahertz)
Zeigt die Verteilung interstellaren Wasserstoffs in kalten Wolken (hier lokalisiert durch Radiostrahlung des Kohlenmonoxids)

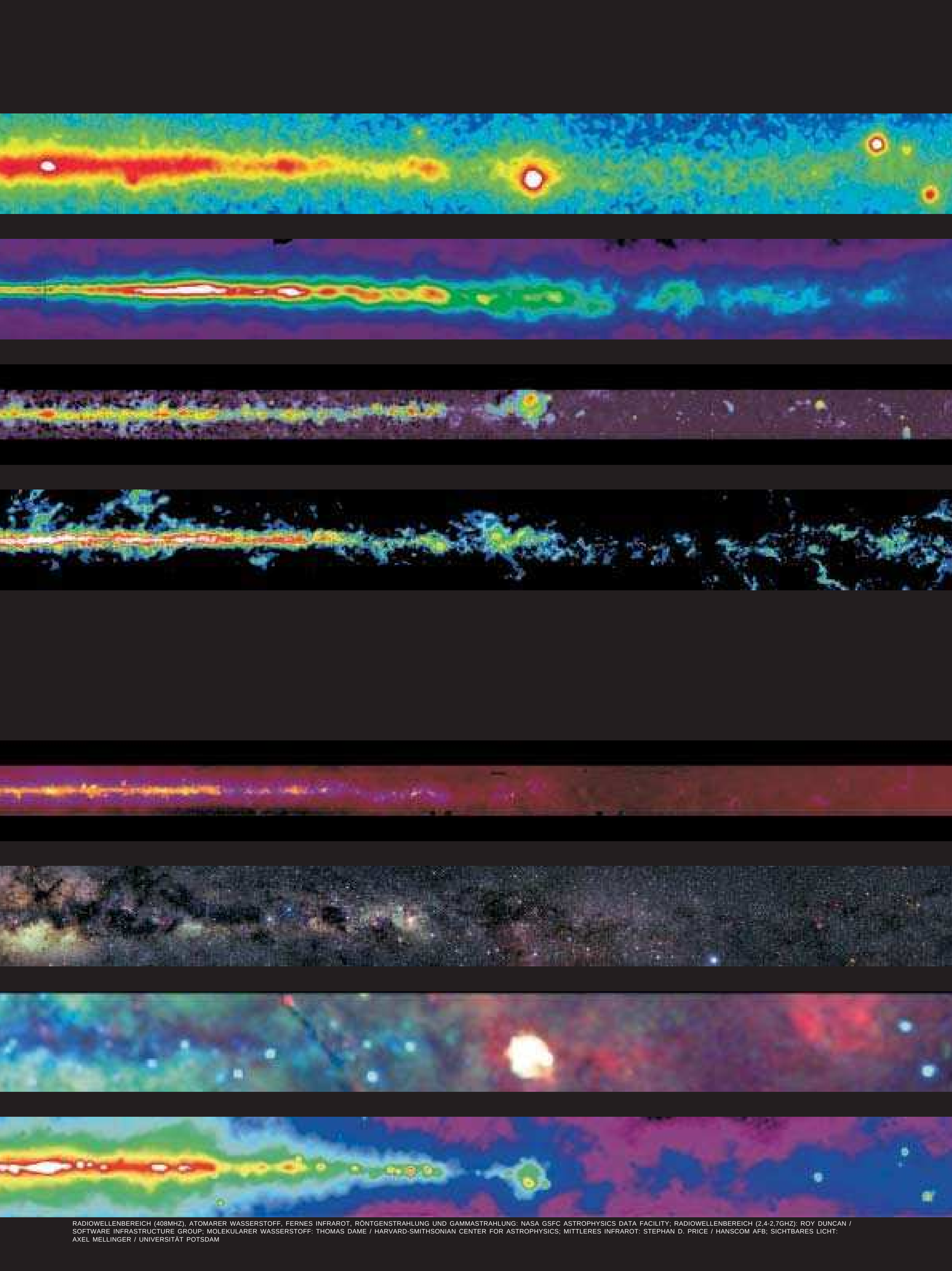
fernes Infrarot
(Wellenlänge 12 – 100 Mikrometer)
Zeigt Staub, der von Sternenlicht aufgewärmt wird, vor allem in Sternentstehungsgebieten

mittleres Infrarot
(Wellenlänge 6,8 – 10,8 Mikrometer)
Zeigt komplexe Moleküle in interstellaren Wolken, auch rote Sterne

sichtbares Licht
(Wellenlänge 400 – 600 Nanometer)
Hell erscheinen nahe Sterne und dünnes, ionisiertes Gas; dunkle Bereiche bestehen aus kaltem, dichtem Gas und Staub

Röntgenstrahlung
(Energie 0,25 – 1,5 Kiloelektronenvolt)
Zeigt Gas, das durch Stoßwellen von Supernovae aufgeheizt wurde

Gammastrahlung
(Energie höher als 300 Megaelektronenvolt)
Zeigt hochenergetische Strahlungsquellen wie Pulsare und kosmische Strahlung



RADIOWELLENBEREICH (408MHZ), ATOMARER WASSERSTOFF, FERNES INFRAROT, RÖNTGENSTRAHLUNG UND GAMMASTRAHLUNG: NASA GSFC ASTROPHYSICS DATA FACILITY; RADIOWELLENBEREICH (2,4-2,7GHZ): ROY DUNCAN / SOFTWARE INFRASTRUCTURE GROUP; MOLEKULARER WASSERSTOFF: THOMAS DAME / HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTROPHYSICS; MITTLERES INFRAROT: STEPHAN D. PRICE / HANSCOM AFB; SICHTBARES LICHT: AXEL MELLINGER / UNIVERSITÄT POTSDAM

100 Kelvin vor. Eingebettet sind diese Verdichtungen in einer diffuseren und wärmeren Phase mit Dichten von nur 0,1 Atomen pro Kubikzentimeter und Temperaturen von einigen tausend Kelvin. Das meiste H I befindet sich nahe der galaktischen Ebene und bildet eine etwa 300 Parsec (1000 Lichtjahre) dicke Scheibe – das ist etwa halb so dick wie die Hauptscheibe aus Sternen, die man als Milchstraße am Nachthimmel sieht.

Wasserstoff kann auch in einer molekularen Form (H_2) vorkommen, die allerdings kaum direkt nachzuweisen ist. Die meiste Information darüber verdanken wir Radiobeobachtungen eines anderen Moleküls, Kohlenmonoxid, das fast immer mit dem molekularen Wasserstoff gemeinsam auftritt. Die Wasserstoffmoleküle scheinen auf die dichtesten und kältesten Wolken beschränkt zu sein, wo sie vom energiereichen Licht heißer Sterne – das die Moleküle in ihre Atome spalten könnte – abgeschirmt werden. Diese dichten Wolken, die zugleich Sternentstehungsgebiete sind, finden sich in einer nur 100 Parsec dicken Schicht am „Boden“ der galaktischen Atmosphäre.

Bis vor kurzem konnten H_2-Moleküle nur dort direkt beobachtet werden, wo sie bereits von der UV-Strahlung oder Winden naher Sterne zerstört, also in atomaren Wasserstoff umgewandelt wurden. In solchen Regionen strahlt das Gas im infraroten Spektralbereich bei einer Wellenlänge von 2,2 Mikrometern. In den letzten Jahren haben aber auch Spektrografen von einer Erdumlaufbahn aus im Ultravioletten bei einer Wellenlänge von 100 Nanometern nach molekularem Wasserstoff gesucht. Zu diesen Instrumenten gehören Orfeus-Spas, eine Plattform, die von deutschen Instituten und Firmen gebaut wurde, und der neue Satellit FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) der Nasa. Diese Messgeräte registrieren Wasserstoffwolken, die in der Sichtlinie zu fernen Sternen oder Quasaren liegen. Das von diesen Lichtquellen kommende Licht wird von molekularem Wasserstoff teilweise absorbiert, sodass im beobachteten UV-Spektrum charakteristische Absorptionslinien zu sehen sind. Der große Vorteil dieser Methode: Mit ihr lässt sich auch molekularer Wasserstoff in ruhigen Regionen der Galaxis ausfindig machen, die weit weg sind von heißen Sternen.

Kühle, dichte Wolken mit Schutzfunktion

Forschergruppen um Philipp Richter von der Universitätssternwarte Bonn – jetzt an der Universität von Wisconsin – und Wolfgang Gringel von der Universität Tübingen fanden Überraschendes: H_2 kommt nicht nur in Wolken hoher Dichte in der galaktischen Scheibe vor, sondern auch in Regionen geringer Dichte weit außerhalb dieser Scheibe. Dieser Befund wirft Fragen auf: Wie werden die Moleküle dort vom zerstörerischen UV-Licht heißer Sterne abgeschirmt? Gibt es auch in dieser großen Entfernung von der galaktischen Ebene kühle, dichte Wolken, die diese Schutzfunktion übernehmen?

Wasserstoff kann des Weiteren in ionisierter Form vorliegen, also als ein Plasma aus geladenen Teilchen. Die Astronomen hatten lange angenommen, dass ionisierter Wasserstoff – kurz als H II bezeichnet – nur in wenigen, räumlich begrenzten Bereichen vorkommen würde: in den leuchtenden Emissionsnebeln in der Nähe heller Sterne und in den diffusen Explosionswolken von Supernovae. Fortschritte in der Detektortechnik und der Beginn der Beobachtungen vom Weltraum aus haben diese Vorstellung modifiziert. Zwei neue Komponenten der Atmosphäre unserer Galaxis wurden so entdeckt: heißer und warmer ionisierter Wasserstoff mit Temperaturen von rund einer Million beziehungsweise rund zehntausend Kelvin.



Diese kegelförmige Riesenblase, von den Fachleuten „W4-Chimney“ genannt (gestrichelte Linie), wurde vermutlich von einem Haufen massereicher Sterne geschaffen. In ihrem Zentrum gibt es eine V-förmige Struktur, so als sei das Gas durch Supernova-Explosionen und starke Sternwinde zurückgefegt worden. Für das Bild wurden Radio- und Infrarotaufnahmen von kühlem Wasserstoffgas überlagert.

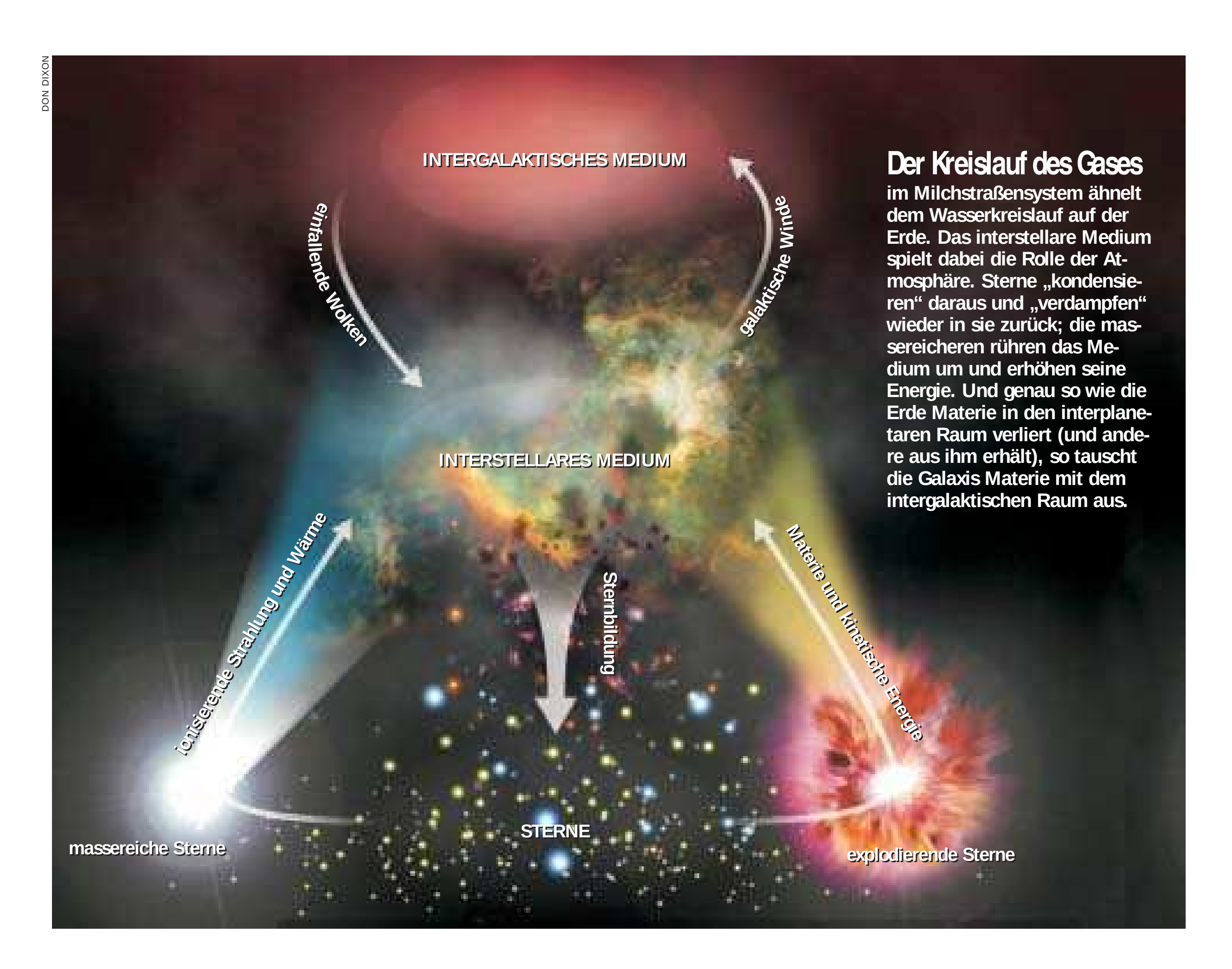
JAYANNE ENGLISH / UNIVERSITÄT OF MANITOBA; CANADIAN GALACTIC PLANE SURVEY AND RUSS TAYLOR / UNIVERSITY OF CALGARY

Wie die kürzlich entdeckten Wasserstoffmoleküle erstrecken sich auch diese H-II-Regionen weit oberhalb der Schicht aus kalten H-I-Wolken und bilden einen ausgedehnten Gas-„Halo“ um die Galaxis. „Interstellar“ scheint nicht mehr die rechte Beschreibung für diesen Sachverhalt zu sein. Die heißere Phase mag sich durchaus mehrere tausend Parsec von der galaktischen Ebene nach außen erstrecken und bis zu einer Dichte von 10^{-3} Ionen pro Kubikzentimeter ausdünnen. Sie ist gleichsam die Korona unserer Galaxis, das Gegenstück zur ausgedehnten heißen Atmosphäre unserer Sonne. Und wie bei ihr deutet das schiere Vorhandensein einer galaktischen Korona auf eine ungewöhnliche Energiequelle hin, die ihre hohe Temperatur aufrechterhält. Stoßwellen von Supernovae und schnelle Sternwinde scheinen die Ursache dafür zu sein. Die warme Phase hingegen wird durch energiereiche Strahlung aus dem extremen UV-Bereich aufgeheizt. Das Gewicht dieser ausgedehnten Schichten erhöht den Gasdruck auf die galaktische Ebene, was sich deutlich auf die Sternbildung auswirkt. Andere Galaxien scheinen ebenfalls Koronae zu haben: Der Röntgensatellit Chandra sichtete eine bei der Galaxie NGC 4631 (siehe Bild Seite 39).

Nun, wo die neuen, energiereicheren Phasen des interstellaren Mediums identifiziert sind, stellt sich die Frage nach ihrem Verhalten und den Wechselwirkungen untereinander. Nicht nur durchläuft das Medium einen Kreislauf durch die Sterne, es verwandelt sich auch von H_2 in H I in H II und von kalt nach heiß und wieder zurück. Die einzige bekannte Energiequelle, die stark genug ist, um für all diese Aktivität zu sorgen, sind massereiche Sterne. Wie Ralf-Jürgen Dettmar von der Universität Bochum zeigen konnte, verfügen Galaxien mit einer überdurchschnittlichen Population massereicher Sterne auch über besonders aufgeblähte Atmosphären.

Wie es die Sterne bewerkstelligen, eine komplette Galaxie zu beeinflussen, ist noch schleierhaft. Den Schlüssel zu all dem sehen die meisten Astronomen aber in der Produktion von heißem, ionisiertem Gas. Dieses entsteht, wenn Stoßwellen einer Supernova mit Geschwindigkeiten von 100 bis 200 Kilometern pro Sekunde durch das interstellare Medium rasen. Je nach Gasdichte und lokalem Magnetfeld kann solch eine kugelförmig expandierende Stoßwelle eine riesige Blase von 100 bis 200 Parsec Durchmesser freifegen.

Die Stoßwellen beschleunigen dabei einen kleinen Teil der Ionen und Elektronen fast auf Lichtgeschwindigkeit. Über



Der Kreislauf des Gases im Milchstraßensystem ähnelt dem Wasserkreislauf auf der Erde. Das interstellare Medium spielt dabei die Rolle der Atmosphäre. Sterne „kondensieren" daraus und „verdampfen" wieder in sie zurück; die massereicheren rühren das Medium um und erhöhen seine Energie. Und genau so wie die Erde Materie in den interplanetaren Raum verliert (und andere aus ihm erhält), so tauscht die Galaxis Materie mit dem intergalaktischen Raum aus.

diese kosmische Strahlung können vergehende Sterne auf die Bildung neuer zurückwirken – positiv wie negativ. Die energiereiche Partikelstrahlung erhöht den Druck des interstellaren Mediums. Höherer Druck wiederum komprimiert dichte Molekülwolken, die dann leichter zu Protosternen kollabieren können. Die kosmische Strahlung ionisiert zudem einen Teil des Wasserstoffs und begünstigt dadurch chemische Reaktionen, durch die komplexe Moleküle entstehen, auch solche, die zu den Grundbausteinen des Lebens gehören. Und weil die geladenen Ionen eng mit den magnetischen Feldlinien verbunden sind, halten sie umgekehrt das Feld in den Wolken fest, was den Kollaps zu Protosternen bremst.

Wenn heiße Blasen häufig genug entstehen, können sie sich zu einem regelrechten Schaum riesiger Dimension vereinigen. Diese Idee formulierten Barnham Smith und Donald Cox von der Universität von Wisconsin in Madison in den 70er Jahren. Später fanden Christopher F. McKee von der Universität von Kalifornien in Berkeley und Jeremiah P. Ostriker von der Princeton-Universität, dass die heiße Phase 55 bis 75 Prozent des interstellaren Raumes ausfüllen sollte. Kühlere neutrale Phasen würden sich auf einzelne Wolken innerhalb dieser ionisierten Matrix beschränken. Das bedeutete praktisch eine Umkehrung des traditionellen Bildes, in dem das neutrale Gas dominierte und das ionisierte auf kleine Enklaven beschränkt war.

Löchrig wie Schweizer Käse

Jüngere Beobachtungen scheinen indes zu zeigen, dass die neue Sichtweise richtig ist. Die nahe Spiralgalaxie M101 zum Beispiel verfügt über eine kreisförmige Scheibe aus atomarem Gas, das löchrig ist wie ein Schweizer Käse. Vermutlich haben heiße Sterne diese Löcher freigeblasen. Das Erscheinungsbild einer anderen Galaxie, sieben Milliarden Lichtjahre entfernt, scheint diese Erklärung zu bestätigen. Aber wie viel von diesem heißen Gas vorhanden ist und wie es die Struktur der galaktischen Atmosphären beeinflusst, wird noch manche Debatte unter den Astronomen auslösen.

Unsere Sonne selbst scheint sich in einer heißen Blase zu befinden, die sich durch die Röntgenstrahlung hochionisierter Ionen wie etwa Sauerstoff verrät. Diese „lokale Blase" entstand vermutlich vor rund einer Million Jahren durch eine nahe Supernova.

Ein noch spektakuläreres Beispiel liegt 450 Parsec von der Sonne entfernt in Richtung der Sternbilder Orion und Eridanus. Carl Heiles von der Universität von Kalifornien in Berkeley und seine Kollegen haben diese Orion-Eridanus-Blase kürzlich untersucht. Sie geht auf einen außergewöhnlichen Sternhaufen im Orion zurück, eine OB-Assoziation. Das sind Ansammlungen der heißesten und massereichsten Sterne der Spektraltypen O und B, 20- bis 60-mal massereicher als die Sonne und tausend- bis hunderttausendmal heller. Als einige dieser kurzlebigen Sterne in den letzten zehn Millionen Jahren als Supernovae explodierten, wurde das Gas in der Umgebung zu einer dünnen Schale um den äußeren Rand der Blase zusammengeschoben. Im sichtbaren Licht erscheint die Schale als ▶

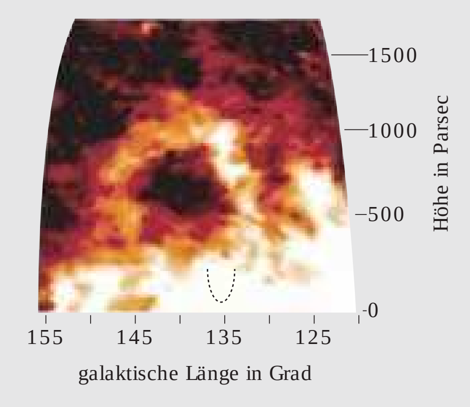
schwaches Geflecht aus ionisierten Bögen und Filamenten. Das Millionen Grad heiße Gas im Inneren der Blase erzeugt im Röntgenbereich ein diffuses Glühen.

Im gesamten Gebiet dieser Riesenmolekülwolke, in der sich die OB-Assoziation befindet, haben sich zahlreiche neue Sterne gebildet, und ein Ende dieses Prozesses ist nicht in Sicht. Einer der jüngsten O-Sterne in dieser Region, Theta^1 C Orionis, ionisiert ein kleines Gebiet der Wolke, das nun als Orionnebel leuchtet. Irgendwann jedoch werden Supernovae und ionisierende Strahlung die Molekülwolke vollständig zerreißen und ihre Moleküle zerstören. Der molekulare Wasserstoff wird dann wieder zu atomarem und ionisiertem Wasserstoff, und die Sternentstehung kommt zum Erliegen. Weil aber der heftige Umwandlungsprozess den Druck im interstellaren Medium erhöht, kann der Untergang dieser Molekülwolke durchaus anderswo in der Galaxis die Bildung von Sternen auslösen.

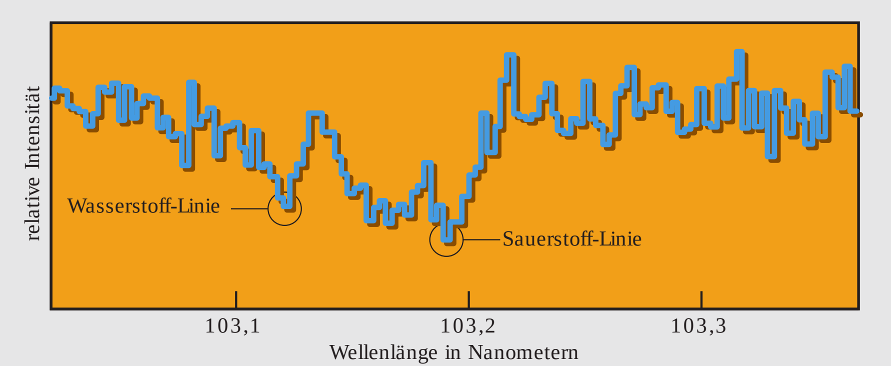
Die riesigen Blasen im interstellaren Medium sollten einen Auftrieb von der galaktischen Ebene weg erfahren, ganz wie eine Thermik über heißem Boden auf der Erde. Numerische Berechnungen, wie sie kürzlich Mordecai-Mark MacLow vom Amerikanischen Museum für Naturgeschichte in New York und seine Kollegen durchgeführt haben, weisen darauf hin, dass solche Blasen bis in den Halo der Galaxis aufsteigen können. Das Resultat wäre ein kosmischer Schlot oder Schornstein, durch den Gas, das Supernovae in der galaktischen Ebene aufgeheizt haben, bis in die obere Atmosphäre des Milchstraßensystems gelangen kann. Dort würde sich das Gas abkühlen und zurück auf die galaktische Scheibe regnen. Das Ganze wäre ein Riesenspringbrunnen von wahrhaft galaktischer Dimension.

Solche großräumigen Gasströmungen könnten vielleicht die heiße galaktische Korona und sogar das Magnetfeld des Milchstraßensystems verursachen. Nach Berechnungen von Katia M. Ferrière vom Midi-Pyrénées-Observatorium in Frankreich kann die Kombination des Auftriebs und der Rotation der galaktischen Scheibe als Dynamo wirken, ebenso wie Bewegungen tief im Innern der Sonne und der Erde Magnetfelder erzeugen.

Doch noch ist nicht bewiesen, dass die heiße Phase tatsächlich weit verbreitet ist und dass es galaktische Springbrunnen gibt. Die Orion-Eridanus-Blase liegt 400 Parsec über der galaktischen Ebene, und eine weitere riesenhafte Blase im Sternbild Cassiopeia befindet sich 230 Parsec über ihr. Doch beide sind noch 1000 bis 2000 Parsec von der galaktischen Korona entfernt. Magnetfelder und kühleres, dichteres ionisiertes Gas könnten die Riesenblasen am Ausbrechen in den Halo hindern. Aber wo sollte die heiße Korona sonst hergekommen sein? Es gibt keine plausible Alternative.



Ein gigantischer Bogen aus warmem ionisiertem Gas erhebt sich über der Scheibe unseres Milchstraßensystems. Er befindet sich direkt oberhalb des Schornsteins W4 (gepunktete Linie), der im Bild auf Seite 36 zu sehen ist. Für beide Strukturen mag derselbe Sternhaufen ursächlich sein.



Heißes Plasma umgibt auch unser Milchstraßensystem. Der Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer entdeckte diese Spektrallinie stark ionisierten Sauerstoffs in einer Gaswolke, die ein Quasar von hinten beleuchtet. Die Wolke ist mindestens 5000 Parsec von der Scheibe entfernt.

Mysteriöses Plasma

Das warme, etwa 10000 Kelvin heiße Plasma ist genauso rätselhaft. Dem traditionellen Bild des interstellaren Mediums zufolge dürfte es gar nicht überall im interstellaren Raum vorkommen. Lediglich in bestimmten Regionen des Weltraums wie in den Emissionsnebeln, die durch heiße, überschwere Sterne aufgeheizt werden, sollte es anzutreffen sein. Nur ein Stern unter fünf Millionen gehört in diese Klasse, und das meiste interstellare Gas – atomarer und molekularer Wasserstoff – lässt ihre Strahlung nicht durch. Folglich sollte der Großteil der Galaxis frei von warmem Plasma sein. Und doch ist es überall vorhanden. Eine kürzliche Himmelsdurchmusterung namens WHAM spürte es sogar im galaktischen Halo auf, fern aller heißer O-Sterne. In anderen Galaxien ist es ebenfalls weit verbreitet. Wie nur konnten die ionisierenden Photonen solche Distanzen von ihren Sternen zurücklegen?

Die Blasen könnten die Antwort sein. Wenn Supernovae signifikante Teile des interstellaren Mediums ausgehöhlt haben, können ionisierende Photonen weite Strecken zurücklegen, bevor neutraler Wasserstoff sie absorbiert. Die OB-Assoziation im Orion bietet ein exzellentes Beispiel, wie so etwas funktionieren kann. Die O-Sterne sitzen in einer riesigen Höhle, die frühere Supernovae geschaffen haben. Ihre Photonen können sich nun frei in der Höhle ausbreiten und gar ihre Wand erreichen und sie zum Leuchten bringen. Wenn sich galaktische Springbrunnen oder Schornsteine wirklich bis in den galaktischen Halo erstrecken, dann könnten sie nicht nur die heiße Korona, sondern auch die weite Verbreitung des warmen ionisierten Gases erklären.

Eine neues WHAM-Bild der Riesenblase in der Cassiopeia liefert ein Indiz: einen Bogen aus warmem Gas, der sich weit oberhalb der Blase erstreckt, bis zu 1200 Parsec von der galaktischen Ebene entfernt. Der Umriss dieses Bogens erinnert entfernt an einen Schornstein, außer dass er (noch) nicht in den äußeren Halo der Galaxis durchgebrochen ist. Um eine solch gigantische Struktur hervorzurufen, ist eine enorme Energie nötig – mehr als die Sterne in dem Haufen geliefert haben könnten, welche die kleinere Blase schufen. Auch die erforderliche Zeit wäre zehnmal so lang wie die Lebens-

NASA UND DANIEL WANG / UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS, AMHERST (RÖNTGENSTRAHLUNG); NASA/UIT (ULTRAVIOLETT)

Heißes Plasma
umhüllt die Scheibe der Galaxie NGC 4631, wie Daten des Röntgensatelliten Chandra zeigen (blau und lila). Das Ultraviolet Imaging Telescope macht massereiche Sterne innerhalb der Scheibe sichtbar (orange).

5000 Parsec

dauer des Haufens. Der Bogen mag deshalb das Produkt mehrerer Sterngenerationen sein, geschaffen von einer Serie einzelner Starbursts aus einer Zeit vor der Entstehung des heutigen Sternhaufens. Jeder Starburst schoss neue Energie in die Blase, die der vorangegangene geschaffen hatte, und trieb sie weiter voran.

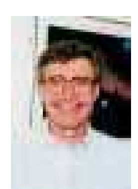
Dass weite Bereiche der Galaxis von der Bildung massereicher Sterne in wenigen begrenzten Gebieten beeinflusst werden können, deutet auf eine gewisse Koordination der Sternentstehung über lange Zeiträume hin. Es mag alles mit einem einzelnen O-Stern oder einem Haufen solcher Sterne in einer Riesenmolekülwolke beginnen. Die Strahlung der Sterne, ihre Winde und Explosionen höhlen das interstellare Medium in einem kleinen Gebiet aus. Die Geburtswolke wird dabei vielleicht zerstört, aber der Vorgang mag Sternbildung in einer benachbarten Wolke auslösen und so weiter, bis das interstellare Medium in dieser Ecke der Galaxis einem Schweizer Käse ähnelt. Die Blasen beginnen sich zu überlappen und verschmelzen zu einer Riesenblase, einer *superbubble*. Die Energie von mehr und mehr O-Sternen füttert diese expandierende Riesenblase, bis der Auftrieb sie von der galaktischen Ebene bis in den Halo gestreckt hat – ein galaktischer Schornstein ist entstanden.

Die Riesenblase bildet nun einen Strömungskanal für heißes Gas aus dem Inneren des Milchstraßensystems, das bis in die oberen Bereiche der galaktischen Atmosphäre gelangt und dort eine ausgedehnte Korona formt. Fern von seiner ursprünglichen Energiequelle beginnt sich das koronale Gas langsam abzukühlen und zu Wolken zu kondensieren. Diese Wolken fallen zur Mittelebene der Galaxis zurück, womit sich der springbrunnenartige Kreislauf schließt: Die galaktische Scheibe wird mit kühlen Wolken gefüttert, in denen irgendwann vielleicht wieder Sterne entstehen können.

Obwohl die Hauptkomponenten und -prozesse unserer galaktischen Atmosphäre identifiziert zu sein scheinen, bleiben viele Details noch unklar. Fortschritte sind zu erwarten, wenn die Astronomen weiter untersuchen, wie das Medium durch die Sterne prozessiert wird, sich in seine verschiedenen Phasen umwandelt und zwischen der Scheibe und dem Halo transportiert wird. Beobachtungen an anderen Galaxien liefern zudem eine Art Vogelperspektive auf die interstellaren Geschehnisse.

Einige entscheidende Puzzleteile könnten immer noch fehlen. Sind zum Beispiel die Sterne wirklich die Hauptenergiequelle für das interstellare Medium? Der Bogen über der Cassiopeia-Riesenblase ähnelt verdächtig manchen Protuberanzen, den Verdichtungen der Sonnenkorona, die sich hoch über der Oberfläche unseres Zentralgestirns erheben – und im Wesentlichen von Magnetfeldern gesteuert werden. Könnte es sein, dass magnetische Aktivität auch die Atmosphäre unserer Galaxis dominiert? Wenn das der Fall sein sollte, dann wäre die Analogie zwischen den galaktischen Atmosphären und ihren stellaren und planetaren Gegenstücken sogar noch treffender als wir denken. ■

Ronald J. Reynolds *ist Professor für Astronomie an der Universität von Wisconsin in Madison. Er hat hochempfindliche Spektrometer entworfen und gebaut, um das warme ionisierte Gas im Milchstraßensystem zu untersuchen. Und er ist Projektleiter des Wisconsin H-Alpha Mapper, mit dem er zwei Jahre lang den Wasserstoff am gesamten Nordhimmel kartiert hat.*



Literaturhinweis

Ionizing the Galaxy. Von Ronald J. Reynolds in: Science, Band 277, S. 1446. (1997).

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Wie Maden Mörder entlarven

Manch komplizierter Kriminalfall kann heute mit Hilfe von Insektenkundlern aufgeklärt werden. Gliedertiere besiedeln Kadaver zeitlich gestaffelt in Wellen. Die Leichenbewohner verraten manches über Tathergang und Todeszeit.

Von Mark Benecke

Ein paar Fliegenmaden halfen, die Todesumstände zu ermitteln. Die Leiche des Mannes lag im offenen Wasser nahe der schwedischen Insel Öland. Der Kopf war schon bis auf die Knochen verwest. Der Körper dagegen, der in einem Rettungsring hing, war noch nicht skelettiert. Vielmehr wirkte er wie aus Wachs geformt. Solches Fettwachs bildet sich unter längerem Luftabschluss, wenn Körperfett verseift.

Die Fliegenmaden saßen auf dem Schädel. Es handelte sich um Larven einer Seetangfliege, wissenschaftlich *Coelopa frigida*, die im offenen Meer nicht vorkommt, sondern an den Küsten der Ostsee lebt.

Die Leiche wurde Anfang Juni 1966 gefunden. Die Ermittlungen ergaben später, dass sie viereinhalb Monate im Wasser gelegen hatte, durch den Rettungsring mit dem Kopf über der Oberfläche. Schmeißfliegen, die einen Kadaver schnell zerstören, hatten den Toten bei den winterlichen Temperaturen nicht aufgesucht. Doch am Fundort herrscht eine Meeresströmung, die vorher an einer Küste entlangfließt, an der Seetangfliegen vorkommen. Diese Strömung berührt noch früher ein Meeresgebiet, in dem im Januar desselben Jahres ein finnisches Schiff untergegangen war. Demnach war der Tote vermutlich Seemann des gesunkenen Schiffes gewesen. Im kalten Meer war er bald erfroren, und die Leiche muss nach einiger Zeit an jener Küste vorbeigetrieben sein, wo Seetangfliegen auf ihr Eier ablegten.

Wie dieser Fall zeigt, handelt es sich durchaus nicht immer um eine Straftat, wenn die Polizei an der Spurensuche bei Todesfällen Insektenkundler – Entomologen – beteiligt. Auch andere Todesumstände lassen sich durch die Zusammenarbeit aufklären. Nicht selten besteht allerdings doch der Verdacht auf eine kriminelle Handlung, bis hin zum Mord. Der Insektenbefall der Leiche kann dabei viele Fragen klären helfen. So lässt sich anhand deren Besiedlung der Todeszeitpunkt manchmal recht präzise eingrenzen, auf den Tag oder sehr selten sogar auf die Stunde genau. Die verschiedenen Insekten, die eine Leiche nacheinander besiedeln, und zwar besonders die Fliegen und hauptsächlich ihre Maden, stellen regelrecht eine lebende Uhr dar. Auch ob der Mensch am Fundort starb oder an anderer Stelle, lässt sich unter Umständen durch die Kerbtiere, ihre Spuren und Überreste ermitteln – wie im Falle des Seemanns.

Insektenbefunde helfen aber nicht nur dabei, Todesfälle aufzuklären, sodass Täter überführt oder Selbstmorde erkannt werden. Genauso gut entlasten sie manchmal Beschuldigte. So kann sich erweisen, dass scheinbare Wunden nicht zu Lebzeiten durch fremde Gewalteinwirkung entstanden, sondern nach dem Tod durch Insektenfraß. Sogar ob eine Person Gift erhielt oder Drogen nahm, können Insekten anzeigen, die auf den Überresten gelebt haben.

Die forensische Entomologie, also die gerichtsmedizinisch-kriminalistische Insektenkunde, ist zwar eigentlich keine neue Fachdisziplin, doch in Deutschland ist sie selbst bei Kriminalisten erst seit wenigen Jahren wieder bekannt. Die kriminaltechnische Methode wird überhaupt nur in wenigen Ländern praktiziert, allen voran Frankreich, die Vereinigten Staaten und Kanada. In Deutschland fasste sie nach dem Zweiten Weltkrieg erst Mitte der neunziger Jahre wieder Fuß.

Dabei begannen systematische Forschungen über die Besiedlungsmuster von Insekten auf Leichen und deren Spuren schon in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Vorher wussten die Menschen zwar, dass „Würmer“– nach heutigem Verständnis Insektenlarven, darunter Maden – die Weichteile von Toten zersetzen. Das bezeugen seit dem 15. Jahrhundert viele bildliche Darstellun-



Larven der Schmeißfliege *Protophormia terranovae* fressen faules Gewebe. Mediziner verwenden sie manchmal zum Reinigen von Wunden, da sie gesundes Fleisch nicht zerstören.

gen, auf denen zerfressene Leichen musizieren oder die Auferstehung erwarten. Der schwedische Naturforscher Carl von Linné (1707–1778) erwähnte als Beispiel dafür, wie rasch sich Leichenbewohner vermehren: Drei Fliegen könnten einen Pferdekadaver ebenso schnell zerstören wie ein Löwe.

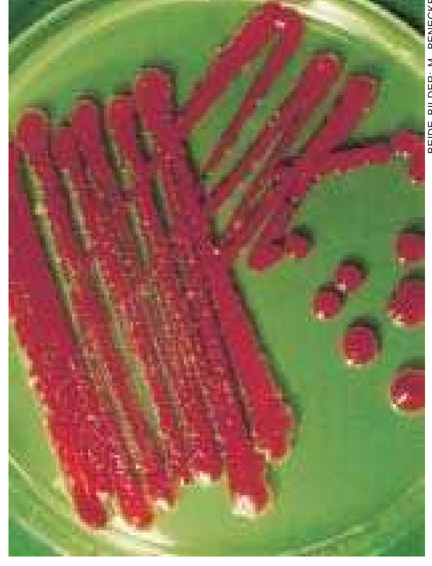
Die ersten genaueren Berichte darüber, wie Insekten und andere Gliedertiere Leichen befallen, stammen aus der Mitte des 19. Jahrhunderts. Zunächst waren solche Studien Einzelfälle. 1850 sammelte der französische Mediziner Bergeret von einem toten Säugling Fliegenpuppen und Mottenlarven und versuchte, anhand ihrer Entwicklungszeiten zu bestimmen, wann das Neugeborene gestorben war. In der Wohnung, in der das Kind aufgefunden worden war, hatten nacheinander mehrere Familien gelebt. Bergeret wollte herausfinden, zu welcher Familie der schon vertrocknete Leichnam gehörte. Allerdings setzte er die Entwicklungszeiten der Insektenlarven viel zu lang an.

Ende der siebziger Jahre des 19. Jahrhunderts berichtete der französische Rechtsmediziner Paul Brouradel in einem ähnlichen Fall, er habe auf einer Säuglingsleiche Milben gefunden. Brouradel erkannte auch schon, dass das Alter einer normalen Leiche anhand der darauf angetroffenen Gliedertiere genauer zu ermitteln ist als das eines vertrockneten Leichnams (der sehr alt sein kann).

Umfangreichere Studien führten um 1880 der Dresdener Zoologe H. Reinhard und der Wiener Insektenkundler ▶



Dieses Skelett im Schnütgen-Museum Köln wurde im 16. Jahrhundert aus Elfenbein geschnitzt. Der Künstler versah es mit Schmeißfliegen und deren Larven. An Stelle des Herzens sitzt eine Fliege.



BEIDE BILDER: M. BENECKE

Die Blutströpfchenbakterien aus einer Schmeißfliegenpuppe zeigen, dass der Tote an einer Bakterieninfektion starb.

Brauer durch, als in Sachsen das Bestattungswesen neu geregelt wurde und man darum ganze Friedhöfe aushob. Die Forscher entdeckten etwa in Särgen Buckelfliegen. Die nur zwei Millimeter langen Insekten graben von flachen Gräbern Gänge an die Oberfläche. So können sie in einem Grab über mehrere Generationen leben. In einem verschlossenen Zinn-Sarg fanden dieselben Forscher parasitische Schlupfwespen, die sich von Fliegenmaden ernähren. Der Sarg stand in einer Gruft, nicht in einem Erdgrab.

Drei Maden und eine Ameise überführen den Ehemann als Mörder

Etwa zur selben Zeit begann der französische Mediziner Jean Pierre Mégnin seine langjährigen Aufzeichnungen über die Phasen, in denen Insekten einen toten Körper befallen. Er unterschied schließlich acht Besiedlungswellen, die bei einem freiliegenden Kadaver gewöhnlich aufeinander folgen, gekoppelt an den Zersetzungszustand: „frischtot“ – „beginnende Fäulnis“ – „Fette“ – „käseartige Produkte“ – „ammoniakalische Fäulnis, Schwärzung“ – „beginnende Vertrocknung“ – „starke Vertrocknung“ – „Skelettierung“. Bei begrabenen Leichen beschrieb er nur zwei Stadien.

Ein 1894 erschienenes Buch des Mediziners über die Fauna auf Kadavern gilt als Meilenstein in diesem Forschungsgebiet. Bald wurden breitere Kreise auf das Fach aufmerksam. Ein kanadisches Forscherteam begann kurz darauf systematische Studien an menschlichen freiliegenden Leichen und auch an lange begrabenen Toten.

In Frankreich und Deutschland begünstigte der Zeitgeist solche Forschungen. Der Zoologe Alfred Brehm (1829–1884) in Deutschland und stärker noch der Insektenforscher Jean-Henri Fabre (1823–1915) in Frankreich hatten mit ihren populären tierkundlichen Werken ein allgemeines Interesse für Kleingetier wie Insekten geweckt (siehe auch „Jean-Henri Fabre“, SdW 11/94, S. 102). Der Insektenband von Brehms „Thierleben“ erschien 1877.

Nach dem Zweiten Weltkrieg geriet die forensische Entomologie aber fast in Vergessenheit. In Europa hielten nur drei Insektenkundler die Methode wach. In Deutschland war sie der Gerichtsmedizin jahrzehntelang praktisch unbekannt. Offensichtlich bot die Spezialdisziplin Wissenschaftlern in dieser Zeit keine Existenzgrundlage.

Das änderte sich im deutschsprachigen Raum vor fünf Jahren nach dem Mord an einer Pastorenfrau im Sommer 1997. In einem aufwendigen Indizienprozess, bei dem ich als Gutachter mitwirkte, wurde schließlich der Ehemann der Ermordeten der Tat überführt.

Die Erschlagene hatte mit schweren Gesichts- und Schädelverletzungen im Wald gelegen, auf ihr ein morsches Stück Holz, das auch ihr Gesicht verdeckte. Gerichtsmediziner konnten den Todeszeitpunkt wegen fortgeschrittener Verwesung nicht mehr genau bestimmen. Aus der Größe dreier Schmeißfliegenmaden zu schließen, die die Ermittler mir extra mit einem Sonderflug nach New York schickten, konnte die Frau nicht länger als drei Tage tot sein. Die übrigen Umstände ließen die Ermittler vermuten, dass sie kurz nach der Tat in den Wald gebracht worden war. Der Ehemann hatte für die vermutete Zeit kein Alibi. Außerdem haftete an seinen Gummistiefeln, die zu Hause standen, die gleiche Erde und Laubstreu, wie sie am Fundort vorkamen, nicht aber in der Nähe seiner Wohnung. Eines der wichtigsten Indizien war jedoch eine Ameise, die an den Stiefeln klebte. Auf der Toten krabbelten viele Ameisen derselben Art, die der Myrmekologe Bernd Seifert vom Naturkundemuseum Görlitz als Glänzend Schwarze Holzameise, *Lasius fuliginosus*, bestimmte. Wie der Ameisenexperte belegte, stammten diese Tiere mit sehr großer Wahrscheinlichkeit von einem Ameisennest in einem Baum ganz in der Nähe. Vom selben Baum kam das morsche Holzstück. Die betreffende Ameisenart bildet sehr große Staaten; die einzelnen Nester liegen allerdings sehr weit verstreut, sodass man nur selten auf sie trifft.

Der meines Wissens älteste dokumentierte Fall, in dem Insekten einen Mörder sozusagen überführten, ereignete sich im 13. Jahrhundert in China. Ein Bauer war nahe bei einem Reisfeld erstochen worden. Der Ermittler wies ein oder zwei Tage später alle Feldarbeiter an, ihre Sicheln vor ihm auf den Boden zu legen. Eines dieser Werkzeuge schien für Fliegen auffallend attraktiv: Etliche flogen diese eine Sichel an. Als der Er-



HAUPT & HAUPT



HAUPT & HAUPT



M. BENECKE

Diese und andere Schmeißfliegenarten suchen Leichen früh auf: Links eine Goldfliege, *Lucilia ampullacea*; In der Mitte Graue Fleischfliegen, *Sarcophaga carnaria*; rechts eine Calliphoriden-Art bei der Eiablage auf einem Betttuch, das eine Leiche umhüllt.

Die Goldkette mit Schmeißfliegen-Anhängern (links) stellte im alten Ägypten den höchsten militärischen Tapferkeitsorden dar.



ÄGYPTISCHES MUSEUM KAIRO

mittler nun den Verdacht äußerte, das sei die Tatwaffe, denn daran klebten offenbar noch Blutreste, gestand ihr Besitzer den Mord. Der Mann hatte bei dem Getöteten Schulden.

Erst wenige Jahre sind dagegen vergangen, seit meine Arbeitsgruppe bestätigen und erklären konnte, was die ermittelnde Polizei in einem Fall im US-Bundesstaat Nebraska vermutete: dass es trotz Blutspuren einen weiteren Ermordeten nicht gab. Man entdeckte in einem verschlossenen Raum zwei erschossene Menschen. Hoch oben in einer Zimmerecke fanden sich außerdem unerklärliche Blutsprenkel. Durch die Schüsse konnte das Blut aber nicht dorthin gespritzt sein. Doch woher sonst kam es, wenn es einen dritten beiseite geschafften Getöteten oder schwer Verwundeten offenbar nicht gab? Unsere Nachforschungen erwiesen, dass Fliegen die Blutspritzer verursacht hatten. Am Boden hatten sie Blut aufgenommen und an der Zimmerecke kleine Tröpfchen wieder abgegeben.

Zu den ersten Aufgaben eines zu Rate gezogenen Entomologen gehört es gewöhnlich, möglichst genau zu berechnen, seit wann der Leichnam an der Fundstelle liegt. Weit über 100 Arten von Insekten – besonders Fliegen und Käfer – und anderen Gliederfüßern, etwa Milben, nutzen Kadaver als Lebensraum, Nahrungsquelle oder Brutstätte.

Insekten-Uhr zeigt Liegezeit

Weil die verschiedenen Arten einen Leichnam in unterschiedlichen Phasen der Zersetzung aufsuchen und zudem jede Art andere Entwicklungszeiten hat, können Experten aus dem Besiedlungsmuster sowie der Larvengröße die so genannte Liegezeit der Leiche an einem Ort oder insgesamt seit der Insektenbesiedlung abschätzen. Allerdings müssen sie dazu andere Begleitumstände möglichst genau kennen, etwa die Wetter- und insbesondere die Temperaturverhältnisse. Die Entwicklungszeit hängt auch von Lichteinfall und Luftfeuchtigkeit ab. Bei schwülheißer Witterung mit gelegentlichem Regen können Schmeißfliegenmaden einen kleinen Körper in zwei Wochen freiskelettieren, unter kühlen Bedingungen brauchen sie mitunter zwei Jahre.

Für begrabene Leichen gelten eigene Bedingungen, wieder andere für luftdicht verpackte Tote. Insektenkundler können manchmal nachträglich feststellen, wie viel Zeit zwischen Tod und Beerdigung verstrich und in welchem Zustand sich der Leichnam bei der Grablegung befand. Die Eier von Schmeißfliegen können beispielsweise in luftdichten Behältnissen bis zu fünf Tage überleben, nicht aber ihre Larven. Auf begrabenen Leichen wohnen oft vor allem Buckelfliegen, die bis zu einem halben Meter tief Gänge in die Erde graben. Buckelfliegen verpaaren sich im Freien, doch die Leiche dient ihnen als Wohnstätte und ihren Larven als Nahrungsquelle.

In günstigen Fällen, wenn Gliedertiere sofort Zugang zum Leichnam hatten, können Entomologen die Liegezeit ziemlich exakt bestimmen – sehr selten sogar bis auf die Stunde genau. Die präzisesten Messungen sind besonders in den ersten Tagen und Wochen nach dem Tod möglich. Die errechnete Zeit wird oft noch sicherer, wenn Larven mehrerer Insektenarten verglichen werden können. In kontrollierten Experimenten mit zwei Fliegenarten, die Wissenschaftler auf Hawaii durchführten, ließ sich der Todeszeitpunkt nach 40 bis 50 Tagen auf ein bis vier Tage genau angeben. Liegt der Tod länger zurück, kann es immer noch gelingen, nachträglich an Puppen oder toten erwachsenen Tieren den Monat oder die Jahreszeit festzustellen. Auch das kann hilfreich sein, etwa um in Vermisstenfällen die Aktensuche zeitlich einzugrenzen oder bei Alibi-Fragen.

Die Leiche muss dazu nicht mehr unbedingt am ursprünglichen Ort liegen. Denn zum Verpuppen verlassen viele Maden ihren Fressplatz. Manchmal findet der Entomologe in der Nähe später noch in Ritzen oder unter Teppichen versteckte leere Puppenhüllen oder im selben Raum oder in Nachbarräumen die daraus geschlüpften Fliegen. Umgekehrt können Milbenbisse einen Täter verraten: wenn sie von Milben stammen, die nur am Leichenfundort leben.

Die „Maden-Uhr“ beginnt nicht selten gleich nach dem Tod zu ticken. Fliegenweibchen der betreffenden Arten nehmen Leichen von für ihre Larven geeignetem Verwesungsgrad oft über einige hundert Meter oder mehr wahr.

Die Ersten, die einen freiliegenden Leichnam für ihren Nachwuchs nutzen, sind meist schwangere Schmeißfliegenweibchen (unter anderem aus den Familien Calliphoridae und Sacrophagidae). Sie suchen einen Kadaver oft unmittelbar nach dem Tod auf. Dazu gehören die metallisch goldgrünen Goldfliegen, die Graue Fleischfliege und die blau schimmernde Schmeißfliege. Die millimetergroßen Larven schlüpfen in der Wärme teils schon nach einer Viertelstunde. Erst später kommen die Käsefliegen, gelegentlich auch Blumenfliegen, Dungfliegen und andere Kerbtiere.

Von vielen dieser Arten kennen Entomologen außer dem Verwesungsstadium, das die Weibchen jeweils bevorzugen, auch die Entwicklungszeiten der Larven – genauer gesagt die Dauer der einzelnen Larvenstadien und die Zeit bis zur Verpuppung, und sie wissen, wie sich diese Zeiten mit der Temperatur oder den übrigen Umweltbedingungen verändern. Gleiches gilt für die Dauer, bis aus der Puppe das geschlechtsreife Tier schlüpft. Im Falle der Pastorenfrau herrschte zum Beispiel am Tag der Tat Nieselregen. Das wie auch die Temperatur an den anderen Tagen musste ich bei der Berechnung der Larvenalter berücksichtigen.

Entlarvende Fraßspuren

Für solche Berechnungen können wir inzwischen teilweise Computermodelle verwenden. Allerdings darf man sich auf die Ergebnisse dann nicht blind verlassen. Es erfordert viel Erfahrung, um die Randbedingungen und den Fehlerspielraum zu ermessen.

Zu welcher Art die Larven gehören, lässt sich vielfach nur an feinen Details der winzigen so genannten Mundwerkzeuge und der Atemöffnungen am Körperende bestimmen, die dazu herauspräpariert werden müssen. Beides ist sehr schwierig und liefert bei jungen Larven auch kaum auswertbare Ergebnisse. Wenn möglich, lässt man darum einige Maden unter kontrollierten Bedingungen im Labor heranwachsen, denn erwachsene Fliegen sind leichter unterscheidbar. Falls genügend Zeit ist, kann man die Art auch mittels einer Erbgutanalyse bestimmen.

Ausgetrocknete Leichen werden oft massenhaft von Speck- und Teppichkäfern besiedelt, die das nun harte Gewebe fressen. Käferbesatz lässt sich nachträglich oft gut rekonstruieren, da Käfer bei ihren Häutungen die festen, darum beständigeren Chitinpanzer hinterlassen – anders als Fliegenmaden mit ihren dünnen, weichen Larvalhäuten. Viele Käfer, die man auf Leichen antrifft, ernähren sich nicht von dem Kadaver direkt, sondern von auf ihm lebenden Maden und Pilzgeflechten. Einige parasitische Erzwespen legen ihre Eier in Fliegenmaden oder -puppen ab, in denen ihre Nachkommen dann heranwachsen.

Nicht immer entstehen Insektenfraßspuren erst nach dem Tod. Von Ameisen oder Schaben verursachte Wunden oder Madenbefall können auch ein Zeichen von Vernachlässigung sein, was bei Bettlägrigen, Säuglingen und anderen pflegebedürftigen Personen immer wieder vorkommt. Allerdings ist hierbei zu bedenken, dass Fliegen ihre Eier auch in Wunden von sehr schwachen Menschen ablegen und die Maden unter Umständen schon nach einer Viertelstunde schlüpfen, und dass Kakerlaken unbemerkt in nur einer Nacht eine kleine Hautblase zu einer flächigen Abschürfung ausfressen können. (Ärzte – so in Feldlazaretten im Ersten Weltkrieg und auch noch heute in Krankenhäusern – nutzen Madenfraß an Wundgewebe sogar gezielt aus, weil die Fliegenlarven nur totes Gewebe aufnehmen und infizierte Wunden darum besonders gut säubern.)

Die Erfahrung eines darauf geschulten Insektenkundlers kann auch dabei helfen zu beurteilen, ob ein betreuungsbedürftiger Mensch tatsächlich vernachlässigt wurde oder nicht. Bei Verstorbenen kann daher bei Verdacht auf Ver-



Insekten und andere Gliedertiere besiedeln Tote in Wellen. Die meisten Arten bevorzugen bestimmte Zersetzungszustände von Leichen. So legen Schmeißfliegenweibchen ihre Eier oft schon in ganz frühen Phasen ab. Käsefliegen folgen erst viel später. Im Gegensatz zu den Speckkäfern wählen sie für ihre Maden aber feuchte Bedingungen. Doch nicht alle Leichenbewohner ernähren sich vom Leichengewebe. Totengräberkäfer etwa fressen als erwachsene Tiere Fliegenmaden, die auf Leichen leben.



M. BENECKE

Bei einem Experiment im Sommer in den USA war der Schweinekadaver schon nach wenigen Tagen kaum noch im Laub zu erkennen.

nachlässigung oder Misshandlung ein forensisch erfahrener Entomologe hinzugezogen werden. Denn mancher Tatverdacht erweist sich im Nachhinein als falsch. Hautwunden, die wie eine Verletzung durch eine Waffe aussehen, rühren manchmal von Insektenfraß her. Zu den berühmten Fällen aus den Anfangszeiten der forensischen Entomologie zählt der eines toten Säuglings mit Mundverletzungen, die so aussahen, als hätte jemand dem Kind Schwefelsäure zu trinken gegeben, um es umzubringen. Doch dann stellte sich heraus, dass es sich um Kakerlakenfraßstellen handelte, die erst nach dem Tod entstanden waren. Ein anderes Beispiel: Eine entkleidete Frauenleiche bedeutet nicht zwangsläufig ein Sexualdelikt. Madenteppiche können die Kleidungsstücke total verrutschen lassen, so als ob diese von einem Täter weggezerrt wurden.

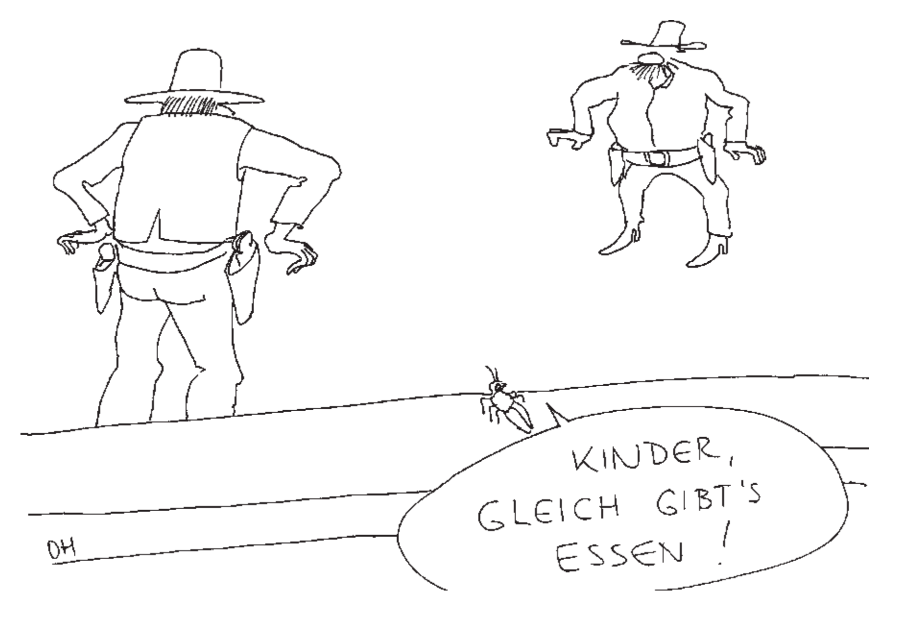
Wie genau die Angaben sein können, die Entomologen in ungeklärten Todesfällen beisteuern, zeigt ein Fall aus Kanada, der sich Mitte der neunziger Jahre ereignete. Ein Versicherungsangestellter wurde misstrauisch, als ein Mann bei der Lebensversicherung seiner Frau die Todesfallprämie einforderte. Denn die Frau war erst drei Tage vorher vermisst gemeldet worden. Der Angestellte erklärte dem Ehemann, der Tod der Frau sei unbewiesen, solange die Leiche oder ein eindeutig identifizierbares Leichenteil fehle. Acht Tage später meldete der Mann sich wieder, diesmal bei der Polizei: In einem Graben vor seinem Haus habe er den Kopf seiner Frau gefunden.

Wie Rechtsmediziner feststellten, war der Kopf erst einige Zeit nach dem Tod der Frau abgetrennt worden. An der Schnittfläche fand meine kanadische Kollegin Gail Anderson Maden von Schmeißfliegen. Auffälligerweise saßen keine Maden an Augen, Nase und Ohren, wo Fliegenweibchen ihre Eier bei einem unversehrten Leichnam bevorzugt absetzen. Der Kopf – oder der Leichnam – musste demnach anfangs an einem Ort gelegen haben, wo Fliegen ihn nicht erreichen konnten. Später, als der Kopf im Freien lag, war für die Fliegen die offenbar frische Schnittfläche attraktiver – das heißt für die Maden leichter anzufressen – als die schon trockeneren Partien an Augen und Ohren. Die Entomologin errechnete aus der Madengröße und den Außentemperaturen, dass der Kopf am selben Tag ins Freie gekommen war, an dem der Ehemann sich an die Versicherung gewandt hatte. Das Gericht verurteilte den Mann zu lebenslanger Haft.

Am häufigsten werden Entomologen bei schon stärker zersetzten Leichen zu Rate gezogen, bei denen manche rechtsmedizinischen Aussagen nicht mehr möglich sind. In diesem Stadium können die Insekten auch Hinweise auf Gifte liefern, die zum Tod geführt haben könnten, am Toten selbst jedoch nicht mehr nachweisbar sind. Denn wenn der Mensch durch eine Rauschdroge, ein Schlafmittel oder ein anderes Gift starb, etwa Arsen oder Quecksilber, dann nehmen manche Larven diese Stoffe auf und können sie speichern. Aber nicht nur die Larven weisen das Gift dann auf, sondern auch in den längst verlassenen Hüllen der Puppen bleibt es manchmal erhalten. Das gilt ebenfalls für Rauschdrogen wie Heroin und Kokain. Sogar die erwachsenen Insekten, die selbst wenig Nahrung aufnehmen, enthalten mitunter noch solche Gifte, wie seit den 1970er Jahren erwiesen wurde. Nach neuen Erkenntnissen könnte es in Einzelfällen sogar möglich sein, auf die Giftmenge rückzuschließen, die der Tote im Körper hatte.

Dieses Gebiet wird in der forensischen Entomologie zurzeit stark beforscht, unter anderem weil sich zeigte, dass sich die Entwicklungsgeschwindigkeit einiger Insekten verändert, wenn sie solche Gifte aufnehmen. Unter Kokaineinfluss etwa wachsen manche Maden schneller. Diese Wirkungen muss man kennen, um Fehlschlüsse zu vermeiden.

In jüngerer Zeit fanden die ersten Giftbestimmungen mittels Insekten Ende der 1970er Jahre in den Vereinigten Staaten statt. Ein Frauenskelett wurde gefunden, das Schmeißfliegenmaden bis auf einige Hautreste abgefressen hatten, und eine vermisste Frau hatte an dem Tag, an dem sie zuletzt gesehen wurde, ein Schlafmittel gekauft. Toxikologen wie- ▶







ALLE BILDER: M. BENECKE; ZEICHNUNG NACH PETERSON

Links: Oft liefern erst die herauspräparierten Mundwerkzeuge der Larven (kleines Bild) Anhaltspunkte zur Fliegenart. Oben: ein Leichenbergesack voller Maden, die meisten noch im Fressstadium (erkennbar an den gefüllten Schlünden). Rechts unten: Larven verschiedener Käfer- und Fliegenarten.

sen in den Maden größere Mengen eben dieses Medikaments nach. Der nach dem Zustand des Skeletts errechnete Todeszeitpunkt passte dazu. Nach allem Anschein war die aufgefundene Frau nicht einem Mord zum Opfer gefallen, sondern hatte Selbstmord begangen.

Ähnlich wie bei den Giftbestimmungen können Kerbtiere Hinweise auf eine tödliche bakterielle Infektion liefern. Wenn die Erreger in der verwesten Leiche nicht mehr nachweisbar sind, enthalten doch die Insekten gelegentlich noch solche Keime (Bild Seite 44 oben rechts).

Mein Arbeitsgebiet, die biologische Forensik, erfordert zu gleichen Teilen Kenntnisse in Zoologie, Rechtsmedizin und kriminalistischen Ermittlungsgrundsätzen. Auch ist häufig eine enge Zusammenarbeit von Experten verschiedenster Richtungen und fachlicher Disziplinen erforderlich. Weltweit sind Fachleute dabei, die Gliedertierfauna verschiedener Gegenden zu katalogisieren. Vertieft werden sollten auch die Erkenntnisse über aus Leichen aufgenommene Giftstoffe in Insekten. Die Möglichkeiten dieses Gebietes sind noch nicht ausgeschöpft. Die Analyse von Erbsubstanz zur Identifizierung ist in anderen Zweigen der Kriminalistik inzwischen etabliert. Auch Insekten kann man auf genetische Sequenzen hin untersuchen. Dabei steht nicht so sehr die menschliche Erbsubstanz im Verdauungstrakt der Insekten im Mittelpunkt, sondern die Bestimmung der Insektenart.

Im deutschsprachigen Raum werden Insektenkundler bisher von der Kriminalistik fast nur zu besonders schwierigen Fällen hinzugezogen. Wünschenswert wären Verhältnisse wie in Frankreich, Kanada und den Vereinigten Staaten, wo diese Methoden teilweise routinemäßig eingesetzt werden. Die französische Staatspolizei besitzt sogar ein eigenes entomologisches Labor. In Nordamerika können Kriminalisten und Juristen während ihrer Ausbildung an Spezialkursen in diesem Fach teilnehmen. Doch hier zu Lande existieren bisher nur zwei noch recht junge Arbeitsgruppen von forensischen Entomologen, die eine in Frankfurt am Institut für Rechtsmedizin und meine eigene in Köln, von wo aus ich mit vielen Partnern in aller Welt zusammenarbeite.

Doch die Bedeutung der forensischen Entomologie wächst. Erstmals trafen sich auf dem Weltkongress für Insektenkunde in Iguazu Falls in Brasilien vor eineinhalb Jahren Entomologen aller Kontinente, die an Insekten auf Leichen arbeiten, und tauschten Erfahrungen sowie neueste Forschungsergebnisse aus. Das Fach wartet auf die nächste Forschergeneration, die sich nicht scheut, eine Sache anzupacken, vor der heute noch viele zurückschrecken – sei es, weil das Gebiet in der Alltagsroutine noch wenig Nachfrage erfährt und darum wenig berufliche Sicherheit bietet, sei es, weil sich die meisten Menschen davor gruseln. Wer sich vor dem Kreislauf des Lebens nicht fürchtet, sondern die tiefe Schönheit des Vergehens und Werdens achtet und wissenschaftlich-kriminalistische Detektivarbeit schätzt, ist eingeladen, auf diesem Feld mitzuwirken. ■

Mark Benecke *studierte in Köln Biologie. Er forschte über individuelle Erbsequenzen von wirbellosen Tieren und promovierte über forensische Spuren von Menschen. Unter anderem arbeitete er am Institut für Rechtsmedizin der Universität Köln und am Chief Medical Examiner's Office in New York City. Heute wirkt er unter anderem als gerichtlicher Gutachter. Seine Webpage: http://www.benecke.com*

DDP



Literaturhinweise

Kriminalbiologie. Von Mark Benecke. BLT, Bergisch Gladbach 2. Aufl. 2001.

Forensic Entomology Special Issue. Von Mark Benecke (Hg.) in: Forensic Science International, Bd. 120, S. 2–160, 2001.

A Fly for the Prosecution: How Insect Evidence Helps Solve Crimes. Von Lee Goff. Harvard University Press, 2000.

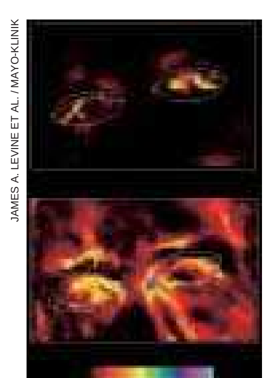
Entomological Evidence: The Utility of Arthropods in Legal Investigations. Von J. H. Byrd und J. L. Castner (Hg.). CRC Press, Boca Raton 2000.

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

FORENSIK

Es steht im Gesicht geschrieben

Wer lügt, verrät sich durch subtile Signale. Schon herkömmliche Lügendetektoren nutzen das aus. Sie registrieren beispielsweise einen Anstieg des Pulses oder der Schweißabsonderung – Zeichen für den Stress, den es bedeutet, die Unwahrheit zu sagen. Nun konnten Wissenschaftler um James Levine von der Mayo-Klinik im amerikanischen Rochester (Minnesota) Lügner allerdings auf noch viel einfachere Weise entlarven – anhand von Wärmesignalen im Gesicht. In einem Experiment ließen sie Versuchspersonen einen vorgetäuschten Raubmord begehen. Dabei mussten die Testverbrecher eine Schaufensterpuppe „erstechen“ und berauben. Ihrer Tat angeklagt, sollten sie ihre Unschuld beteuern – ebenso wie die Personen einer Kontrollgruppe, die keinen „Raubmord“ begangen hatten. Mit einer Infrarotkamera überführten die Wissenschaftler immerhin Dreiviertel der Übeltäter und erkannten 90 Prozent der Unschuldigen. Die Erfolgsquote entsprach damit derjenigen herkömmlicher Lügendetektoren. Da die Wärme-Methode ohne Körperkontakt und spezielles Fachpersonal auskommt, eignet sie sich nach Ansicht der Forscher für eine Vielzahl von Situationen – etwa bei Sicherheitskontrollen an Flughäfen. Auch in großen Menschenmengen ließen sich damit verdächtige Personen ausfindig machen. *(Nature, Bd. 415, S. 35)*


JAMES A. LEVINE ET AL. / MAYO-KLINIK

Wärmemuster im Gesicht – oben vor der Frage, unten danach – verraten den Lügner.

CHEMIE

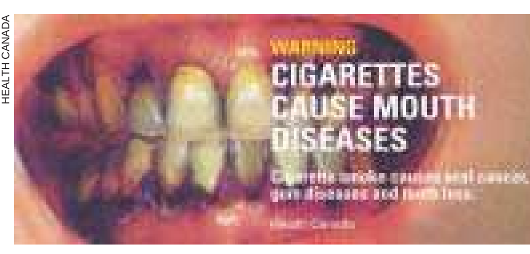
Natur als Umweltsünder

Wenn PCB, DDT und andere organische Chlorverbindungen in der Umwelt auftauchen, ist für viele klar: Der Mensch war's. Diese Stoffe gelten geradezu als Inbegriff der Chemie, die mit ihren künstlichen Produkten die Umwelt vergiftet. Doch dieses Urteil ist vorschnell. Tatsächlich entstehen, wie Satish C. B. Myneni von der Universität Princeton (New Jersey) jetzt zeigte, chlororganische Stoffe auch ganz natürlich beim biologischen Abbau von Pflanzenmaterial. Mit einer speziellen Methode (der Röntgenabsorption) konnte der US-Forscher verrottetes pflanzliches Gewebe analysieren, dessen Schadstoffgehalt mit üblichen chemischen Analyseverfahren wie der Atomabsorption nicht nachweisbar ist. Blätter, Stängel, Wurzeln und Rinde enthalten in frischem Zustand Chlorid-Ionen. Diese reagieren bei der Zersetzung des Pflanzenmaterials zu chlorierten Kohlenwasserstoffen – ring- oder kettenförmigen Molekülen mit ein bis zwei Chloratomen. Die Forschungsergebnisse werfen auch ein neues Licht auf die Schädlichkeit von Organochlorverbindungen in der Umwelt. Kommt die Natur mit ihnen – den natürlichen wie den anthropogenen – womöglich besser zurecht als bisher angenommen? *(Sciencexpress, 17.1.2002)*

GESUNDHEIT

Heilsamer Schock

Ein Gehirn nach einem Schlaganfall, Lungentumoren, verrottete Zähne – diese schlimmen Folgen des Rauchens sind seit einem Jahr in Kanada auf Zigarettenpackungen abgebildet. Ab 2003 sollen die Horrorbilder auch in Europa den Freunden des blauen Dunstes den Genuss verleiden. Wirkt die Abschreckung? Offenbar ja. Dies ist zumindest das Ergebnis einer Studie der Canadian Cancer Society. Die teils drastischen Darstellungen auf den Päckchen bewogen immerhin 44 Prozent der rauchenden Probanden, an einem Entwöhnungsprogramm teilzunehmen; 27 Prozent reduzierten ihren Tabakgenuss zu Hause. Auch der spontane Griff zur Zigarette wurde gebremst. In 21 Prozent der Fälle steckten Raucher das schon gezückte Päckchen wieder ein, wenn ihr Blick auf die Bilder fiel. Auch erklärten 35 Prozent aller Befragten, dass die Darstellungen ihnen die gesundheitlichen Konsequenzen des Rauchens bewusster gemacht hätten.



HEALTH CANADA

Abschreckung für Raucher: verrottete Zähne auf der Zigarettenpackung

PALÄONTOLOGIE

Flotte Schwergewichte

Dinosaurier galten bisher als plumpe Kolosse, die mit ihrem groben Knochenbau schwerfällig daherstapften. Doch neu entdeckte fossile Fußspuren eines aufrecht gehenden, zweibeinigen Raubsauriers (Theropoden) aus der Verwandtschaft von *Tyrannosaurus rex* widerlegen dieses Vorurteil. Danach waren die urzeitlichen Echsen durchaus fähige Sprinter, die es mit dem Menschen hätten aufnehmen können. Die 163 Millionen Jahre alten Abdrücke im Ardley-Steinbruch in der englischen Grafschaft Oxfordshire liegen zunächst noch auf einer recht breiten Zickzacklinie. Doch dann vergrößert sich ihr Abstand auf mehr als das Doppelte (5,65 Meter), und sie bilden fast eine Gerade. Offenbar verfiel das Tier aus einem gemächlichen Watschelgang in einen flotten Laufschritt. Aus dem Abstand der Trittspuren und der – anhand der Fußlänge geschätzten – Hüfthöhe von knapp zwei Metern berechneten Forscher um Julia Day von der Universität Cambridge die mutmaßliche Geschwindigkeit des Sauriers. Ergebnis: Im Gehen erreichte er etwa sieben Kilometer pro Stunde, im Rennen immerhin rund dreißig – fast das Tempo eines Hundert-Meter-Läufers. Wie lange die Echse diesen Spurt durchhielt, lässt sich der Spur allerdings nicht entnehmen: Sie ist insgesamt nur 35 Meter lang. *(Nature, Bd. 415, S. 494)*


DPA

Spur eines sprintenden Sauriers

PALÄOARCHÄOLOGIE

Menschwerdung: Code X

Die Fähigkeit zu künstlerischem Ausdruck markiert den Übergang vom Früh- zum Jetztmenschen. Als Zeugnisse dieses letzten Schritts in der menschlichen Evolution gelten bisher die bis zu 40 000 Jahre alten Höhlenmalereien in Europa. Doch anscheinend reicht unsere Kultur viel weiter zurück und hat ihren Ursprung da, wo auch die Wiege der Menschheit stand: in Afrika. Dafür sprechen spektakuläre neue Funde aus den südafrikanischen Blombos-Höhlen. Dort haben Christopher Heshnilwood von den Iziko Museums in Kapstadt und eine internationale Forschergruppe zwei – 53 bzw. 76 Millimeter lange – Ockerstückchen entdeckt, die seltsame X-förmige Ritzmuster tragen. Laut Datierung sind sie etwa 77 000 Jahre alt. Damals durchstreifte in Europa noch der Neandertaler die Wildnis. Die Forscher nehmen an, dass die Muster keine realen Objekte abbilden, sondern bewusst gestaltete abstrakte Motive darstellen. Ihre Bedeutung liegt jedoch noch völlig im Dunkeln. Auch ist umstritten, ob es sich tatsächlich um mehr als zweckfreie Kritzeleien handelt. (*Sciencexpress, 10.1.2002*)

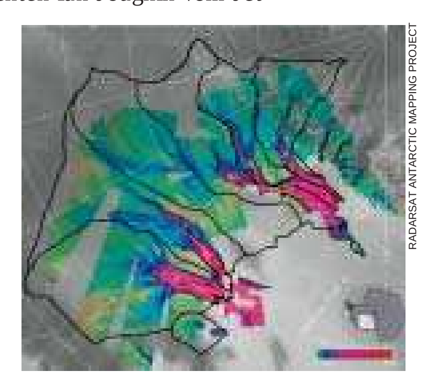

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

Kunst oder Kritzelei? Rätselhafte Ritzzeichen zieren ein 77 000 Jahre altes Ockerstück.

KLIMAFORSCHUNG

Polarer Eisschild legt zu

Trotz Erderwärmung nimmt der Eispanzer am Südpol offenbar nicht ab, sondern wächst sogar – zumindest im westlichen Teil der Antarktis. Das berichten Ian Joughin vom Jet Propulsion Laboratory der Nasa in Kalifornien und Slawek Tulaczyk von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz. Die Forscher werteten Satellitendaten zur Fließgeschwindigkeit des Eises aus, die mit radarinterferometrischen Methoden ermittelt wurden. Dabei ergab sich ein Eiszuwachs von fast 27 Milliarden Tonnen pro Jahr – in deutlichem Gegensatz zu früheren Schätzungen, wonach die Westantarktis jährlich etwa 21 Milliarden Tonnen Eis verlieren soll; innerhalb der nächsten Jahrhunderte würde dies den Meeresspiegel um fünf bis sechs Meter steigen lassen – mit katastrophalen Auswirkungen für die Küstenregionen. „In den letzten paar tausend Jahren hat sich der Eisschild zurückgezogen“, so Joughin, „aber wir denken, dass nun das Ende dieses Rückzugs gekommen ist.“ Gleichzeitig gibt er aber zu bedenken, dass dies keinesfalls ein Entwarnungssignal in Bezug auf die globale Erwärmung sei. *(Science, Bd. 295, S. 476)*


RADARSAT ANTARCTIC MAPPING PROJECT

Westantarktis mit großen Eisströmen (rot), Nebenströmen (blau) und den langsam driftenden Eisschilden (grün)

ASTRONOMIE

Röntgenblick ins Herz der Galaxis

Mit dem Weltraum-Röntgenteleskop „Chandra“ konnten amerikanische Astrophysiker den rätselhaften Ursprung der Röntgenemission aus dem Zentrum der Milchstraße klären. Bisher dachte man, dass das hochenergetische Leuchten größtenteils von einer heißen interstellaren Gaswolke stammt. Dem widersprechen die neuesten Daten von „Chandra“. Sie ergeben ein Röntgenbild vom Zentrum der Milchstraße in nie da gewesener Auflösung. Es zeigt mindestens tausend punktförmige Röntgenquellen; nur zwanzig davon waren bereits bekannt. Höchstwahrscheinlich handelt es sich um Binärsysteme, deren eine Komponente ein besonders kompaktes Objekt ist – etwa ein Weißer Zwerg, ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch. Der dichtere Partner saugt wegen seiner stärkeren Gravitation Materie vom Begleiter ab. Diese sammelt sich zunächst in einer so genannten Akkretionsscheibe, in der sie sich auf einer Spiralbahn dem kompakteren Objekt nähert. Die Scheibe heizt sich an ihrem inneren Rand so stark auf, dass intensive Röntgenstrahlung entsteht. Der diffuse Anteil des galaktischen Röntgenlichts rührt wahrscheinlich von der Bildung massereicher Sterne her, die heißes Gas ausstoßen. Einen Beitrag könnte aber auch das gigantische Schwarze Loch im Mittelpunkt der Milchstraße leisten. *(Nature, Bd. 415, S. 148)*


NASA / UMASS / D. WANG ET AL.

Zahlreiche Röntgenquellen (blaue Punkte) im Zentrum der Milchstraße enthüllt diese Aufnahme des Weltraum-Röntgenteleskops „Chandra“.

VERHALTENSPSYCHOLOGIE

Teilen und Helfen – Ursprünge sozialen Verhaltens

Warum geben wir Werten wie Fairness und Altruismus den Vorzug vor schierem Eigennutz? Wie konnte im Darwin'schen Kampf ums Überleben überhaupt großzügiges Verhalten entstehen? Biologen und Spieltheoretiker geben Antwort.

Von Karl Sigmund, Ernst Fehr und Martin A. Nowak

Stellen Sie sich vor, dass Ihnen jemand 100 Euro gibt – allerdings unter einer Bedingung: Sie müssen sich mit einer anderen, Ihnen unbekannten Person einigen, wie Sie beide die Summe untereinander aufteilen. Die Regeln sind streng. Sie und die zweite Person befinden sich in getrennten Räumen und können nicht miteinander kommunizieren. Ein Münzwurf entscheidet, wer von Ihnen vorschlägt, wie das Geld aufzuteilen ist. Angenommen, das Los trifft Sie. Sie dürfen dann ein einziges Teilungsangebot machen, und die andere Person kann dem Angebot zustimmen oder es ablehnen. Diese andere Person kennt ebenfalls die Regeln und die Gesamtsumme, um die es geht. Wenn sie zustimmt, wird das Geld dem Vorschlag gemäß aufgeteilt. Lehnt sie aber ab, so bekommt keiner von Ihnen etwas. In beiden Fällen ist das Spiel damit zu Ende und wird nicht wiederholt. Wie viel würden Sie offerieren?



Viele Menschen bieten fünfzig Prozent der Summe, weil sie das Gefühl haben, dass diese Aufteilung „fair“ ist und daher vermutlich akzeptiert wird. Risikobereitere Spieler versuchen hingegen, mit einem geringeren Angebot besser abzuschneiden.

Bevor Sie sich endgültig entscheiden, können Sie versuchen, sich in die Position der anderen Person zu versetzen. Diese muss eine bestimmte Geldsumme akzeptieren oder zurückweisen. Wenn das Angebot sich nur auf zehn Prozent beläuft, würden Sie dann die 10 Euro annehmen und die andere Person mit 90 Euro abziehen lassen – oder würden Sie vorziehen, dass beide gar nichts bekommen? Was, wenn das Angebot nur 1 Euro beträgt? Ist das nicht besser als gar nichts? Bedenken Sie dabei stets, dass Verhandlungen oder ein Herumfeilschen durch die Versuchsanordnung ausgeschlossen sind. Ein einziger Vorschlag kommt aufs Tapet, und der kann entwe-



Ein Ultimatum-Spiel der etwas anderen Art: Den frommen Herren wird ein Haufen Geld angeboten unter der Voraussetzung, dass sie ihren Geschäftspartnern einen Anteil abgeben, den diese akzeptieren. Leider sind diese Partner Kriminelle, und das Geschäft läuft auf die Aufgabe heiliger Prinzipien hinaus (aus dem Film „Holy Days“, USA 1994, mit Armin Müller-Stahl, Mitte).

der angenommen oder abgelehnt, aber nicht diskutiert werden.

Was würden Sie also tun?

Vermutlich wird es Sie nicht überraschen, dass zwei Drittel der Vorschläge zwischen vierzig und fünfzig Prozent liegen. Nur vier von hundert Personen bieten weniger als zwanzig Prozent. Ein so geringes Angebot ist riskant, weil es abgelehnt werden kann: Mehr als die Hälfte aller Versuchspersonen weisen Angebote zurück, die unter zwanzig Prozent liegen.

Das ist nun allerdings sonderbar: Warum sollte jemand ein Angebot als „zu gering“ verwerfen? Wenn man nur daran interessiert ist, ein möglichst großes Einkommen zu erzielen, wäre doch das einzig rationale Verhalten, jedes Angebot zu akzeptieren – nach dem Motto: Ein Euro ist besser als keiner. Ein eigennütziger Anbieter, der sich sicher ist, dass der andere ebenfalls sein Einkommen maximieren will, sollte daher den kleinstmöglichen Beitrag vorschlagen und den Rest für sich behalten.

Diese Überlegung, die davon ausgeht, dass jeder Mensch rational und zum eigenen Vorteil handelt und darum sein Einkommen maximieren will, führt unweigerlich zu dem Schluss, dass der kleinstmögliche Anteil angeboten und auch akzeptiert wird. Aber die meisten Menschen verhalten sich anders.

Geben und Nehmen – aber mit Gefühl

Das eben beschriebene „Ultimatum-Spiel“ ist ein Experiment aus dem noch kleinen, aber rasch wachsenden Feld der experimentellen Wirtschaftsforschung. Ein Großteil der Wirtschaftstheorie befasst sich mit volkswirtschaftlichen Größen wie Börsenindex, Wechselkurs, Bruttoinlandsprodukt und dergleichen, über die wir viele Daten sammeln, aber keine Experimente anstellen können. Doch wirtschaftliches Verhalten ist natürlich viel älter als diese Begriffe. Ökonomen sind zunehmend fasziniert von ganz simplen Wechselwirkungen – dem Teilen und Helfen, das tagtäglich in Bürogemeinschaften, Haushalten, Familien und Kindergruppen vor sich geht. Auch hier findet man wirtschaftliches Verhalten: ein ständiges Geben und Nehmen, aber sozusagen im Naturzustand, ohne explizite Verträge oder regulierende Körperschaften.

Lange Zeit haben Wirtschaftstheoretiker ein Retortenwesen namens *homo oeconomicus* zur Grundlage ihrer Überlegungen gemacht – ein Individuum, das sich unbeirrbar um die Maximierung des eigenen materiellen Nutzens bemüht. Diese Kreatur hat sich als eine unhaltbare Fiktion erwiesen, und es wurde zu Recht festgestellt, dass in unserer alltäglichen Wirklichkeit ein *homo oeconomicus* wohl rasch als abnorm gelten würde. Aus dem Ultimatum-Spiel und anderen, ähnlich einfachen Experimenten lernt man, dass schon bei den einfachsten Transaktionen Gefühle mindestens so wichtig sind wie Logik und Eigennutz.

Spieltheoretiker erforschen mit solchen Experimenten die Mechanismen, die unserem sozialen und wirtschaftlichen Leben zu Grunde liegen. Diese Untersuchungen liegen an der Nahtstelle zwischen Kultur- und Naturwissenschaften. Für Psychologen wie Wirtschaftstheoretiker gleichermaßen interessant ist ▶

STECKBRIEF

➤ In allen menschlichen Kulturen genießt Fairness hohen emotionalen Wert. In Experimenten wie dem im Artikel beschriebenen Ultimatum-Spiel untersuchen Wissenschaftler die Gründe dafür.

➤ In solchen Spielen sind die Teilnehmer oft großzügiger als von der Spieltheorie vorausgesagt, der zufolge jede Person eigensüchtig ihren eigenen Gewinn zu maximieren sucht. Mehr noch: Wenn ein unfaires Verhalten kostspielige Revancheakte nach sich ziehen kann, verhalten die Spieler sich noch fairer als theoretisch erwartet.

➤ Vermutlich haben die Menschen Fairness über Millionen Jahre hinweg in kleinen Gruppen entwickelt. Die entsprechenden Emotionen fördern ein Verhalten, das der Gruppe und somit auf lange Sicht auch dem Einzelnen Vorteile bringt.

die Frage, wie sich instinktive Verhaltensweisen, die nicht unmittelbar dem Nutzen der Individuen oder der Fortpflanzung ihrer Gene zu dienen scheinen, durch Darwin'sche Selektion entwickeln konnten.

Werner Güth von der Berliner Humboldt-Universität entwickelte das Ultimatum-Spiel vor etwa zwanzig Jahren. Inzwischen sind solche Experimente mit unterschiedlichen Summen und an verschiedenen Orten hundertfach wiederholt worden. Die Resultate erwiesen sich als bemerkenswert robust. Das Verhalten der Spieler hängt nur wenig von Geschlecht, Alter, Ausbildung oder Rechenfertigkeit ab. Auch die Größe des zu verteilenden Betrags hat einen überraschend geringen Einfluss auf die Resultate. In Indonesien beispielsweise ging es bei einer Versuchsreihe um die Aufteilung von Summen, die dem Dreifachen des durchschnittlichen Monatseinkommens der Teilnehmer entsprachen – und dennoch verwarfen manche von ihnen empört Angebote, die ihnen unfair erschienen.

Der Maßstab für Fairness ist kulturabhängig …

Kritiker solcher Studien wandten allerdings ein, dass dafür größtenteils Versuchspersonen aus relativ entwickelten Ländern wie der Schweiz, Japan, den USA oder China herangezogen wurden; besonders häufig handelte es sich um Studenten, weil die meisten Versuche an Universitäten durchgeführt wurden. Vielleicht sind Aussagen über solche Versuchspersonen nicht repräsentativ. Während des größten Teils der Menschheitsgeschichte herrschten gewiss ganz andere Lebensbedingungen als an heutigen Universitäten.

Kürzlich hat eine groß angelegte anthropologische Studie nicht weniger als 15 Stammesgesellschaften aus vier Kontinenten untersucht. Dabei ergaben sich doch einige messbare Unterschiede beim Verhalten im Ultimatum-Spiel. Während etwa bei den Machiguenga, einem Stamm im Amazonas-Becken, das mittlere Angebot um einiges niedriger als in westlichen Zivilisationen lag – nämlich bei 26 statt bei 45 Prozent –, boten viele Mitglieder der Au-Insulaner aus Neuguinea mehr als die Hälfte der Gesamtsumme. Kulturelle Traditionen beim Schenken und die starken Verpflichtungen beim Annehmen von Geschenken spielten bei manchen Gesellschaften eine wichtige Rolle. Die Au etwa lehnten allzu großzügige Angebote ebenso ab wie allzu geringe. Doch trotz all dieser kulturellen Variationen war das Resultat stets weit entfernt von dem, was eine rationale Analyse des Verhaltens von eigennützigen Spielern vorhersagen würde (siehe das Interview auf Seite 56/57). Im entschiedenen Gegensatz zur bloßen Maximierung des eigenen Einkommens legen die meisten Menschen überall auf der Welt hohen Wert auf Fairness.

Im täglichen Leben verlangen viele Situationen eine Abwägung zwischen Eigennutz und Fairness. Doch das Ultimatum-Spiel gehorcht künstlichen Regeln, die im Alltag praktisch nie gelten: Feilschen ist unmöglich, die Spieler kennen einander nicht, die Summe verschwindet, wenn sie nicht beim ersten Versuch aufgeteilt wird, und das Spiel wird nicht wiederholt. Diese Einschränkungen sind aber keineswegs ein Nachteil, denn sie erlauben uns, die Prinzipien, die unseren Entscheidungen zu Grunde liegen, isoliert von allen Nebeneffekten zu studieren – ähnlich wie Physiker, die subatomare Teilchen in Vakuumkammern kollidieren lassen.

Experimentelle Ökonomen haben viele Varianten des Ultimatum-Spiels analysiert. Die Resultate sind höchst aufschlussreich. Wenn etwa die Entscheidung, wer von den beiden Spielern das Angebot macht, nicht durch einen Münzwurf, sondern durch ein Geschicklichkeitsspiel bestimmt wird, sind die Angebote üblicherweise geringer und werden auch eher angenommen – die Ungleichheit wird also eher akzeptiert, und zwar von beiden Teilnehmern. Wenn ein Computer das Angebot macht, werden noch geringere Anteile ohne weiteres akzeptiert. Sind fünf Teilnehmer vorhanden, die das Angebot eines Spielers annehmen können, so darf dieses getrost weitaus niedriger ausfallen. Ein Angebot von nur zehn Prozent wird nunmehr auch von solchen Spielern hingenommen, die es empört ablehnen würden, wenn sie keine Konkurrenten hätten. Eine ähnlich starke Auswirkung hat der wirtschaftliche Wettbewerb unter Anbietern: Wenn fünf Anbieter um die Zustimmung eines einzigen Spielpartners streiten, der bloß einem von ihnen den Zuschlag erteilen kann, dann offerieren sie bis zu achtzig oder neunzig Prozent der Gesamtsumme.

All diese Versuche führen zu demselben Schluss: In paarweisen Begegnungen handeln wir nicht rein eigennützig, sondern ziehen immer auch die Situation des anderen ins Kalkül. Wir sind keineswegs nur am eigenen Einkommen interessiert, sondern vergleichen uns mit dem Mitspieler und verlangen ein faires Ergebnis.

… die emotionale Grundlage nicht

Warum messen wir der Fairness einen derart hohen Wert bei, dass wir auf zwanzig Prozent einer großen Summe verzichten, bloß damit der andere Spieler nicht viermal so viel bekommt wie wir? In dieser Frage gehen die Meinungen weit auseinander. Manche Spieltheoretiker glauben, die Spieler verstünden einfach nicht, dass sie nur ein einziges Mal aufeinander treffen; solche Spieler sähen das Ultimatum-Spiel fälschlich als Auftakt eines Verhandlungsprozesses an. Das Feilschen um den eigenen Anteil einer Ressource muss für unsere Ahnen ein immer wiederkehrendes Motiv gewesen sein. Aber kann es denn für die Versuchspersonen so schwer sein zu begreifen, dass das Ultimatum-Spiel nach einer Runde aufhört? Wie andere Spiele belegen, sind die Akteure sehr wohl in der Lage, den Unterschied zwischen Ein- und Mehrrunden-Spielen zu begreifen.

Ein anderer Erklärungsversuch geht davon aus, dass unsere Vorfahren den Schutz einer starken Gruppe brauchten. Das Überleben von Gruppen von Jägern und Sammlern hängt von den Fähigkeiten und Stärken ihrer Mitglieder ab. Daher muss jedem das Wohlergehen der anderen wichtig sein. Doch erklärt dieses Argument bestenfalls, weshalb so viele Angebote hoch ausfallen, und nicht, warum allzu geringe Angebote ausgeschlagen werden.

Kürzlich haben zwei von uns (Nowak und Sigmund) zusammen mit Karen Page vom Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) ein evolutionäres Modell vorgeschlagen, das eine andere Antwort nahe legt. Unser emotionaler Apparat ist durch Jahrmillionen des Zusammenlebens in kleinen Gruppen geprägt. Dort weiß man meist viel voneinander. Wir sind also nicht auf strikte Anonymität eingestellt, sondern darauf, dass unsere Freunde, Kollegen und Nachbarn unsere Entscheidungen erfahren.

Wenn andere wissen, dass ich mich mit einem kleinen Anteil zufrieden gebe, so werden sie dadurch verlockt, mir niedrige Angebote zu machen. Wenn hingegen bekannt ist, dass mich niedrige Angebote wütend machen und ich sie vehement ablehne, so haben die anderen Gruppenmitglieder allen Grund, mir einen großen Anteil anzubieten. Die Evolution sollte also negative emotionale Reaktionen auf niedrige Angebote favorisieren. Das ist vermutlich ein wichtiger Grund, warum so viele von uns auf geringe Angebote im Ultimatum-Spiel emotional reagieren. Wir haben das Gefühl, so etwas ablehnen zu müssen, um unsere Selbstachtung zu bewahren – und Selbstachtung ist vom evolutionären Standpunkt aus ein Mittel, uns einen Ruf zu erwerben, der uns in zukünftigen Begegnungen nützen kann.

Gerade durch seine krasse Vereinfachung ist das Ultimatum-Spiel typisch für die Szenarien, die experimentelle Ökonomen gern verwenden: hochgradig abstrakte und oft vertrackte Wechselwirkungen zwischen unabhängigen Entscheidungsträgern.

Kooperation ist lukrativ

Die Begründer der Spieltheorie, der ungarische Mathematiker John von Neumann (einer der Väter des Computers) und der österreichische Wirtschaftstheoretiker Oskar Morgenstern, die während des Zweiten Weltkriegs in Princeton zusammenarbeiteten, verwendeten Gesellschaftsspiele wie Poker und Schach, um ihre Ideen zu illustrieren. Zwar können solche Spiele als abstrakte Modelle für soziale und wirtschaftliche Wechselwirkungen dienen, aber die meisten sind Nullsummenspiele: Was ein Spieler gewinnt, verliert ein anderer. Hingegen sind die meisten echten Wirtschaftsbeziehungen keine Nullsummenspiele, sondern sowohl von Wettbewerb als auch von Zusammenarbeit geprägt. So genannte „Gemeinwohl-Spiele“ beschreiben solche Situationen besser als Skat oder Tarock.

In einem der einfachsten Gemeinwohl-Spiele bilden vier Spieler eine Gruppe. Der Versuchsleiter gibt jedem 20 Euro, und die Teilnehmer müssen jetzt unabhängig voneinander entscheiden, wie viel davon sie in eine Gemeinschaftskasse stecken. Der Versuchsleiter verdoppelt dann das Kapital in der Gemeinschaftskasse und verteilt diese Summe zu gleichen Teilen an alle vier Spieler, unabhängig davon, wie viel jeder beigetragen hat.

Wenn jeder Spieler seine 20 Euro in die Kasse legt, verdoppeln alle ihr Kapital. Kooperation ist also höchst einträglich. Aber es gibt eine starke Verlockung, einen Teil des eigenen Beitrags zurückzuhalten. Schierer Eigennutz würde jedem Spieler sogar diktieren, gar nichts beizusteuern: denn von jedem Euro, den er investiert, erhält er nur die Hälfte zurück (das Geld wird vom Versuchsleiter verdoppelt und anschließend durch vier geteilt). Der Versuchsleiter macht das allen Spielern klar, indem er sie ausrechnen lässt, wie viel jeder erhält, wenn beispielsweise Anna 10 Euro beisteuert, Bernhard und Christine je 5 Euro, und ▶

Annehmen oder verschmähen? Aus dem Film „For Better or for Worse“, USA 1989

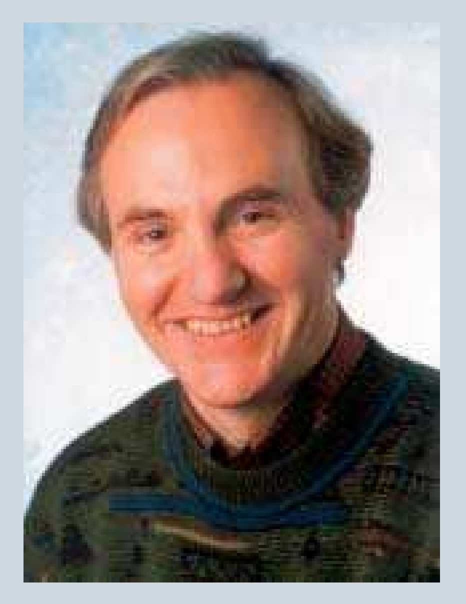


DEFD-MOVIES

INTERVIEW

„Reziproker Altruismus hält auch die Mafia zusammen“

Wir sind gar nicht die kalten Egoisten, als die uns die Wirtschaftstheorie bislang ansah. Aber sind wir deswegen bessere Menschen? „Spektrum der Wissenschaft“ befragte Ernst Fehr, einen der Autoren des Artikels, nach den Konsequenzen der geschilderten Erkenntnisse.



Ernst Fehr ist Direktor des Instituts für Empirische Wirtschaftsforschung an der Universität Zürich.

Spektrum der Wissenschaft: *Sie zeigen mit Ihren Experimenten, dass Werte und soziale Präferenzen unsere Entscheidungen viel stärker bestimmen, als die Wirtschaftswissenschaft mit ihrem* homo oeconomicus *bislang annimmt. Doch ist es nicht sogar klug, bei dem Entwurf von Institutionen von Individuen auszugehen, die nur dann kooperieren, wenn es ihnen nützt? Denn Institutionen, die unter solchen Voraussetzungen funktionieren, müssten bei kooperativeren Menschen doch erst recht gute Ergebnisse bringen?*

Ernst Fehr: Dieses Argument ist falsch. Solche einseitigen Menschenbilder veranlassen manche Wirtschaftswissenschaftler dazu, Anreize zu setzen, die unerwünschtes Verhalten erst erzeugen. Wir haben zum Beispiel untersucht, wie sich unterschiedliche Anreizmechanismen auf freiwillige Kooperation auswirken. Und da gibt es solche, die das Gegenteil des beabsichtigten Effekts haben!

Es ist schädlich, den Menschen mehr Egoismus zu unterstellen, als sie haben

Wenn zum Beispiel ein Arbeitgeber alle Angestellten als potenzielle Nichtstuer betrachtet und das auch kommuniziert, indem er alle möglichen Kontrollen einbaut, dann sinkt bei vielen Angestellten die Motivation derartig, dass sie wirklich nichts mehr tun. Wenn der Arbeitgeber dagegen davon ausgeht, dass alle im Prinzip bereit sind, ordentlich zu arbeiten, engagieren sich auch die meisten. Wir haben in unseren Untersuchungen auch herausgefunden, dass es von Bedeutung ist, wie großzügig der Arbeitgeber seinem Arbeitnehmer gegenüber ist. Wenn er einen Vertrauensvorschuss gibt, etwa in Form eines großzügigen Gehalts, dann wird der häufig von vielen Probanden im Experiment erwidert.

Aber nicht von allen. Unsere Resultate zeigen nie, dass alle Leute freiwillig kooperieren. Die meisten ja; aber es gibt stets einen Teil an Leuten, die rein egoistisch sind.

Spektrum: *Sie verwenden den Begriff starke Reziprozität für diese Bereitschaft, die Kooperation aufrechtzuerhalten. Die Menschen erwidern kooperative Handlungen und neigen dazu, unkooperative zu bestrafen, sogar dann, wenn es für sie kostspielig ist. Versteckt sich dahinter nicht doch langfristig kalkulierter Eigennutz?*

Fehr: In unseren Experimenten schließen wir absichtlich die Faktoren aus, die Kooperationsbereitschaft durch langfristig planenden Egoismus erklären würden: Die Probanden kennen einander nicht, können sich nicht wieder begegnen oder sich durch ihre Handlungen einen guten Ruf erwerben. All diese Faktoren spielen in der Realität natürlich eine Rolle und begünstigen Kooperation. In unseren Experimenten gibt es aber diese Komponenten nicht. Trotzdem entsteht Kooperation. Es handelt sich hier also wirklich um eine Art Altruismus, allerdings um einen, der nicht bedingungslos ist.

Spektrum: *Haben denn die Egoisten unter Umständen auch einen positiven Einfluss auf die Gesellschaft?*

Fehr: Man kann gar nicht so allgemein sagen, dass die einen nützlicher sind als die anderen. Wenn die dominierende Form altruistischen Verhaltens reziprok ist, dann kann das auch zu sehr schlechten Ergebnissen führen. In der albanischen Gesellschaft spielt Rache eine große Rolle, und manche Männer trauen sich jahrelang nicht mehr aus den Häusern, weil sie befürchten, getötet zu werden. Auch als die Kosovo-Albaner nach dem gewonnenen Krieg der Nato gegen die Serben zurückkehrten, haben sich einige von ihnen furchtbar gerächt. Das ist aus einer emotionalen Sicht verständlich, aber aus rechtsstaatlicher Sicht natürlich problematisch. Es führt zum Aufschaukeln der Feindseligkeit. Ein wichtiger Punkt ist auch, dass diese reziproken Verhaltensweisen häufig vor allem die lokale Kooperation in Arbeitsgruppen stützen. Aber nicht jede Kooperation ist gut. Sie stützen auch die enge Kooperation in der Mafia.

Spektrum: *Für die starke Reziprozität werden tief verankerte Gefühle aktiviert: Empörung über Trittbrettfahrer, Scham beim Erwischtwerden, aber auch uneigennützige Freude am Helfen. Solche Gefühle haben wir Menschen auf Grund unserer langen gemeinsamen biologischen Vergangenheit vermutlich gemeinsam. Aber die große Studie mit dem Ultimatum-Experiment in 15 Naturvölkern zeigt ja, dass Fairness und Vertrauen in unbekannte Menschen sehr stark von der Kultur abhängen. In den modernen Industriegesellschaften spielen Fairness und der Wille zur Kooperation eine viel größere Rolle als zum Beispiel bei den in kleinen Gruppen lebenden Hadza in Tansania oder den Machiguenga in Peru. Wie erklären Sie das?*

Fehr: Diese Experimente zeigen, dass Konzepte wie Fairness, Gerechtigkeit oder Kooperation nicht genetisch verdrahtet sein können. Das lernen wir in der Kindheit, und was wir da lernen, hängt von der Lebens- und Wirtschaftsweise ab. Wir haben unsere Ergebnisse unter vier Aspekten betrachtet: Anonymität, Ausmaß der Privatsphäre, Marktintegration und potenzielle Kooperationsgewinne. Und wir haben festgestellt, dass nur die Marktintegration und die Gewinne durch Kooperation eine Rolle spielen. Je stärker die Gesellschaft in den Markt integriert ist, desto

stärker ist das Fairnessmotiv. Und je höher die Gewinne sind, die man aus Kooperation erzielen kann, desto mehr ist auch Kooperation verbreitet. Das sind aber Umweltbedingungen, die der Einzelne überhaupt nicht beeinflussen kann. Wenn ich in einer Gesellschaft geboren bin, die keinen Markttausch kennt, dann werde ich auch auf solche Verhaltensweisen nicht kommen. Wir sind hier aber noch ganz am Anfang. Man kann evolutionäre Modelle konstruieren, aber die sind sehr abstrakt. Auf empirischer Ebene wissen wir erst sehr wenig darüber, welche Faktoren die Gewichte zwischen eigennutzorientiertem und fairnessorientiertem Verhalten verschieben.

Spektrum: *Unsere Gesellschaftsform ist wirtschaftlich sehr erfolgreich. Unser relativ großes Vertrauen in fremde Geschäftspartner und die zuverlässige Kooperation mit Unbekannten sind vermutlich wesentliche Faktoren dieses Erfolgs, schreiben Sie. Denn dies ermöglicht eine wesentlich größere Vielfalt an Tauschhandlungen, als wenn wir die Tauschpartner immer persönlich kennen müssten. Wie messen Sie aber das Vertrauen in Fremde?*

Fehr: Wir haben ein Vertrauensspiel. Bei diesem Experiment gibt der Spielleiter zwei Personen *A* und *B*, die sich nicht kennen, jeweils 10 Franken. Und dann kann *A* einen beliebigen Betrag von seinem Geld an *B* senden. Was er *B* transferiert, wird vom Spielleiter verdreifacht. *B* kann dann wiederum etwas von seinem Gesamtguthaben an *A* zurückgeben. Das ist eine ganz typische unvollständige Vertragssituation, weil es keine durchsetzbare Abmachung gibt. Wären *A* und *B* reine Egoisten, dann würden sie nichts geben und nichts zurückgeben und damit natürlich darauf verzichten, vom Spielleiter etwas dazuzubekommen. Wir stellen aber fest, dass mehr als 80 Prozent der *A*s positive Beträge zu *B* schicken, daraus kann man den Schluss ziehen, dass die ein gewisses Vertrauen in den unbekannten *B* haben. Und zu Recht, denn sehr viele *B*s geben etwas zurück.

Spektrum: *Wie äußert sich dieses Vertrauen in fremde Geschäftspartner denn im Alltag?*

Fehr: Die meisten Leute haben das verinnerlicht und denken gar nicht daran, dieses Vertrauen zu enttäuschen. Dabei wäre es in vielen Fällen möglich, denn viele Tauschverträge sind unvollständig und können nur schlecht durch Zwang von Dritten durchgesetzt werden. Zum Beispiel gibt es beim Taxifahren sicher viele Situationen, wo der Passagier dem Taxifahrer leicht entwischen könnte, ohne zu bezahlen. Wenn der Passagier an einer Straßenseite aussteigt und in der Menge untertaucht, hat der Taxifahrer gar keine Chance, an sein Geld zu kommen. Doch das machen die wenigsten, die meisten bezahlen.

Spektrum: *In einigen Gesellschaften kann man nur durch Beziehungen oder durch Bestechung etwas erreichen. Können Sie den Übergang von der Vetternwirtschaft zu einem funktionierenden Staat schon irgendwie modellieren?*

Fehr: Das ist ein Öffentliches-Gut-Problem wie in unseren Spielen. Wenn ein Land mit einer korrupten Verwaltung zu einem funktionierenden Rechtsstaat wird, dann profitieren langfristig alle davon – außer den korrupten Beamten. Nur müssen sich zunächst eine Reihe von Menschen finden, die die Korruption bekämpfen und die Kosten dafür auf sich nehmen. Nachdem die Korruption beseitigt ist, profitieren auch die davon, die zur Beseitigung nichts beigetragen haben, also die Trittbrettfahrer. Dasselbe gilt bei der Beseitigung von Diktaturen. Es waren die Bürgerrechtler der DDR, die sich unter oft hohen persönlichen Kosten für die Demokratisierung eingesetzt haben. Die haben das öffentliche Gut Demokratie erst produziert. Es gibt aber manchmal auch einfache Maßnahmen, die hilfreich sind. Das hat zum Beispiel eine Studie von Abigail Barr zur Korruptionsbekämpfung in Uganda gezeigt. In den Schulen kamen damals üblicherweise nur etwa dreißig Prozent der vorgesehenen Gelder an. Allein die Tatsache, dass die bewilligten Bildungsmittel in den Schulen öffentlich ausgehängt wurden, konnte den Schwund reduzieren, danach erreichten rund achtzig Prozent der Gelder die Schulen.


BRIAN CRONIN

Das Ultimatum-Spiel: Ein kleines Stück ist besser als nichts; soll man es ablehnen?

Spektrum: *Sie vermuten, dass hinter der Verhaltensänderung im Grunde das Gefühl der Beschämung steckt, wenn öffentlich bekannt wird, wie man sich an einem allgemeinen Gut selbst bedient. Muss das wirklich Scham sein, oder könnte es auch die Furcht vor Konsequenzen sein?*

Fehr: Mir fällt da auch immer das klassische Anreizproblem an der Universität ein. Wenn man erst mal Professor ist, dann ist die Stelle sicher, und man kann sich eigentlich straflos zur Ruhe setzen. Und das führt bei einem gewissen Teil von Professoren dazu, dass sie sich um Lehre und Forschung nicht mehr viel kümmern. Wenn man aber die Publikationslisten regelmäßig veröffentlicht oder die Evaluationen, die Professoren von den Studenten bekommen, gibt es einen gewissen Meinungsdruck. Nur muss man vorsichtig mit solchen Instrumenten umgehen, denn man kann auch übers Ziel hinausschießen.

Spektrum: *Halten Sie es für möglich, aus den Experimenten ihres Instituts wirtschaftspolitische Empfehlungen abzuleiten? Beispielsweise für den Börsenhandel?*

Fehr: Der Börsenhandel ist der Bereich, wo meine Erkenntnisse die geringste Bedeutung haben. Denn der Aktienmarkt ist eine Institution, wo Werte und soziale Präferenzen kaum eine Rolle spielen.

Aber die meisten anderen Bereiche der Gesellschaft: Familie, Vereine, Stadt, Gemeinde, Staat und in Unternehmen – da spielen soziale Präferenzen eine große Rolle. Ich bin auch davon überzeugt, dass wir hier langfristig zu wichtigen Erkenntnissen beitragen, die wirtschaftspolitisch relevant sein können. Unsere Ergebnisse zeigen etwa immer wieder, dass sehr viele Leute bedingt kooperativ sind, aber das hat Grenzen. Sie sind zum Beispiel bereit, die Steuer zu zahlen, wenn sie überzeugt sind, dass die meisten anderen das auch tun. Und sie sind nicht korrupt, wenn die meisten anderen das auch nicht sind … Wenn aber hier bestimmte Schwellenwerte überschritten werden, kann das zum Umkippen führen. Hier muss man ansetzen und den Anfängen wehren, damit die Kooperation nicht zusammenbricht.

Das Interview führte ***Antonia Rötger****, promovierte Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in Berlin.*

Daniel gar nichts. Nach dieser Vorbereitungsphase wird das Spiel dann wirklich gespielt. Wenn jeder Spieler die eigennützige, rationale Strategie verfolgt, die Ökonomen vorhersagen, würde keiner etwas investieren und keiner mit mehr als den ursprünglichen 20 Euro aussteigen. In Wirklichkeit verhalten sich die meisten Teilnehmer aber anders: Viele investieren zumindest die Hälfte ihres Kapitals.

Wenn dieselbe Gruppe das Spiel zehn Runden lang wiederholt, werden die Spieler anfangs wiederum ungefähr die Hälfte ihres Startkapitals einzahlen. In den Schlussrunden investieren die meisten aber gar nichts mehr. Dieser rapide Abstieg von einem ursprünglich hohen Niveau an Zusammenarbeit wurde oft als Lernprozess interpretiert: Die Spieler lernen selbstsüchtiges Verhalten auf die harte Tour, durch eine Reihe enttäuschender Erfahrungen. Aber das kann nicht die richtige Erklärung sein, denn andere Experimente zeigen, dass die meisten Spieler, sobald sie sich in einer neuen Gruppe mit anderen Mitspielern wiederfinden, neuerlich hohe Beiträge in die Gemeinschaftskasse einzahlen. Wie erklärt sich dieses Verhalten?

Experimente, die einer von uns (Fehr) gemeinsam mit Simon Gächter von der Universität St. Gallen (Schweiz) durchgeführt hat, beweisen, dass das Gemeinwohl-Spiel eine dramatische Wendung nimmt, sobald eine neue Möglichkeit eingeführt wird – nämlich die, Mitspieler zu bestrafen. In solchen Spielen können die Teilnehmer den anderen nach jeder Runde eine Geldbuße aufbrummen. Den Geldbetrag kassieren aber keineswegs sie, sondern der Versuchsleiter.

Den anderen zu strafen, erhöht also nicht das eigene Einkommen, sondern kostet den Bestrafenden sogar etwas. Wenn etwa Anna entscheidet, dass Daniel eine Strafe von einem Euro zahlen muss, so kostet sie das 30 Cent. Sowohl der Euro als auch die 30 Cent gehen an den Versuchsleiter.

Rache ist süß

Vom eigennützigen Standpunkt lässt sich die Strafe also nicht rechtfertigen – denn Anna verringert ihr Kapital, ohne dafür etwas zu gewinnen. Trotzdem erweisen sich die meisten Spieler als äußerst willig, ja geradezu darauf versessen, Strafen an jene Mitspieler auszuteilen, die mit ihren Beiträgen nachhinken. Jeder Teilnehmer scheint damit zu rechnen, für geringe Einsätze in die Gemeinschaftskasse bestraft zu werden. Selbst in einem Ein-Runden-Spiel kommt es daher zu mehr Kooperation als sonst. Besonders bedeutsam aber: Wenn das Spiel für eine gewisse, vorher verkündete Zahl von Runden wiederholt wird, nimmt die Bereitschaft zu kooperieren nicht ab. Ganz im Gegenteil – die Beiträge für die Gemeinschaftskasse wachsen stetig an. In den letzten Runden investieren mehr als 80 Prozent der Spieler ihr gesamtes Kapital: ein erstaunlicher Unterschied zu den Spielen ohne Bestrafung.

Es kommt aber noch überraschender. In einem wiederholten Spiel lässt sich die Bestrafung von Mitspielern interpretieren als eine im wohlverstandenem Eigeninteresse liegende Investition in deren Erziehung. Schwarzfahrer werden dazu gebracht, zum Allgemeinwohl beizutragen. Die so entstandenen Kosten für jenen, der die Strafe verhängt, können sich solcherart auf längere Sicht bezahlt machen. Doch in einer kürzlich durchgeführten Variante des Gemeinwohl-Spiels wurde gezeigt, dass dieser ökonomische Aspekt nur eine sekundäre Rolle spielt. Hierbei werden viele Gruppen von jeweils vier Spielern versammelt, und nach jeder Runde werden die Gruppen neu gebildet, sodass nie zwei Teilnehmer mehr als einmal aufeinander treffen. An der Bereitschaft, zu bestrafen, ändert sich nichts, und ebenso wenig am hohen Niveau der Beiträge. Schwarzfahrer werden ebenso streng bestraft wie vordem. Die Investitionen in die Gemeinschaftskasse sind von der ersten Runde an hoch und steigen im Verlauf des Spiels noch weiter an.

Dieses Resultat ist erstaunlich, da der „Gewinn durch Erziehung“ jetzt eliminiert worden ist. Der Bestrafte wird zwar in den folgenden Runden seinen Beitrag meistens erhöhen, aber das kann dem Bestrafenden niemals zugute kommen. Dennoch sind viele Spieler regelrecht erpicht darauf, die Übeltäter zu bestrafen. Die Teilnehmer verspüren eine ganz elementare Freude, es den Schwarzfahrern heimzuzahlen. Sie scheinen weit mehr an persönlicher Rache interessiert zu sein als an einer Steigerung ihres wirtschaftlichen Erfolgs.

Weshalb sind so viele Spieler willens, Kosten zu übernehmen, um die Schwarzfahrer zu bestrafen? Der Wirtschaftsforscher Herb Gintis von der Universität von Massachussetts hat gezeigt, wo die Vorteile liegen könnten. In seinem Modell sind Gruppen mit einem überdurchschnittlichen Anteil an Personen, die bereit sind, andere zu bestrafen, besser im Stande, Krisen wie etwa Kriege, Epidemien und Hungersnöte zu überleben, die den Fortbestand der Gruppe bedrohen. In solchen Situationen sollte die Zusammenarbeit zwischen eigennützigen Individuen zusammenbrechen, weil weitere Wechselwirkungen innerhalb der Gruppe weniger wahrscheinlich werden. Doch durch die drohenden Strafen werden die eigennützigen Gruppenmitglieder viel eher zur Zusammenarbeit bereit sein.

In den meisten Gruppen erwarten die Mitglieder Fairness und Solidarität – ob es sich um Kinder in einem Sommerlager handelt oder um Mafiosi nach einem Banküberfall. Es sind also letztendlich moralische Richtlinien, die einen wesentlichen Teil des Wirtschaftslebens bestimmen.

Darwinistischer Altruismus

Wie konnten sich solche Formen des Sozialverhaltens entwickeln? Das ist ein zentrales Problem für die Darwin'sche Evolutionstheorie. Die Häufigkeit von altruistischen Handlungen – also solchen, die dem Empfänger Vorteile bringen, dem Geber aber Kosten bereiten – ist scheinbar unverträglich mit dem Begriff des „egoistischen Gens“, dem „Prinzip Eigennutz“ und der Vorstellung, dass die natürliche Auslese nur solche Gene fördert, die optimal geeignet sind, ihre eigene Fortpflanzung zu garantieren. Gewinne und Kosten werden in der einzigen Währung gezählt, die biologische Bedeutung hat – dem Erfolg bei der Reproduktion. Gene, die diesen Erfolg schmälern, scheinen kaum dazu bestimmt, sich in einer Bevölkerung auszubreiten.

Bei den sozialen Insekten – Ameisen oder Bienen etwa – erklärt die enge Verwandtschaft zwischen den Individuen

Literaturhinweise

Spielpläne. Zufall, Chaos und die Strategien der Evolution. Von Karl Sigmund. Hoffmann und Campe, Hamburg 1993.

Altruistic Punishment in Humans. Von Ernst Fehr und Simon Gächter in: Nature, Bd. 415, S. 137 (2002).

In Search of Homo Economicus: Behavioral Experiments in 15 Small-Scale Societies. Von Joseph Henrich et al. in: American Economic Review, Bd. 91, S. 73 (2001).

Fairness versus Reason in the Ultimatum Game. Von Martin A. Nowak, Karen M. Page und Karl Sigmund in: Science, Bd. 289, S. 1773 (2000).

Cooperation and Punishment in Public Goods Experiments. Von Ernst Fehr und Simon Gächter in: American Economic Review, Bd. 90, S. 980 (2000).

Game Theory and the Social Contract: Just Playing. Von Kenneth G. Binmore. MIT Press, 1998.



Bisher haben die kaputten Helden in „Der Himmel von Hollywood“ (USA 2000) kooperiert. Nun, im Angesicht der Beute, könnte jeder von ihnen versuchen, nach den Regeln des *homo oeconomicus* mit dem ganzen Geld davonzulaufen. Aber der Film geht anders aus.

den enormen Grad an Zusammenarbeit innerhalb des Ameisenhaufens oder der Bienenkolonie. Doch die menschliche Kooperation funktioniert auch zwischen Nichtverwandten. Sie wird mehr durch ökonomische als durch genetische Verbindungen bewirkt. Dennoch konnten Biologen nachweisen, dass viele Formen scheinbar altruistischen Verhaltens sich durch ihren biologischen Erfolg begründen lassen.

Es mag herzlos erscheinen, Altruismus auf eine Kosten-Nutzen-Rechnung zu reduzieren, besonders wenn diese auf biologischen Notwendigkeiten beruht. Viele von uns ziehen es vor, großzügiges Handeln auf guten Charakter zurückzuführen. Wir fühlen uns einfach besser, wenn wir anderen helfen und mit ihnen teilen. Aber woher kommt dieses innere Wohlgefühl? Es hat eine biologische Funktion. Wir essen und lieben, weil es Genuss bringt. Aber hinter dem Genuss steht das biologische Programm, das uns aufträgt, zu überleben und uns fortzupflanzen. In ähnlicher Weise führen uns soziale Emotionen wie Freundschaft, Scham, Großzügigkeit und Schuldgefühle dazu, biologischen Erfolg innerhalb komplexer sozialer Netzwerke zu erreichen.

Bereits vor Jahrhunderten haben Philosophen wie David Hume und Jean-Jacques Rousseau die entscheidende Rolle der „Natur des Menschen“ im Sozialleben betont. Die Wirtschaftstheoretiker haben es hingegen lange vorgezogen, ihren eigennützigen *homo oeconomicus* zu untersuchen. Sie verwendeten viel Energie und Scharfsinn darauf, zu überlegen, wie ein isoliertes Individuum – ein Robinson Crusoe auf einer einsamen Insel – zwischen verschiedenen Gütern seine Auswahl treffen würde. Aber wir sind keine Robinsons. Seit über dreißig Jahrmillionen leben unsere Vorfahren in sozialen Verbänden zusammen. Und im sozialen Umfeld sind unsere Vorlieben keineswegs nur durch Eigennutz bestimmt.

Menschliches Handeln gehorcht nicht nur egoistischen Erwägungen, sondern auch einem reichen Arsenal sozialer Gefühle. Diese sind ihrerseits Produkt der biologischen Notwendigkeiten, die mit Arbeitsteilung und Kooperation verknüpft sind – also letztlich doch wieder mit wirtschaftlichen Zwängen. „Erst kommt das Fressen, dann kommt die Moral“, allerdings in einem anderen Sinn, als Bert Brecht in seiner „Dreigroschenoper“ gemeint hat. Die Lebensweise der ersten Hominiden, die sich aufrechten Ganges in die Savanne wagten, ließ keine Autarkie bei der Nahrungssuche zu, sondern erzwang die Anpassung an ein auf Gegenseitigkeit beruhendes Gemeinschaftsleben, also eine verinnerlichte Moral – ein Naturrecht im wahrsten Sinn des Wortes.

Ethische Normen und Moralsysteme unterscheiden sich von einer Kultur zur anderen, aber wir dürfen vermuten, dass sie auf universellen, biologisch begründeten Anlagen beruhen, ganz ähnlich wie die Tausenden von verschiedenen Sprachen offenbar einen universellen Sprachinstinkt voraussetzen. Hume und Rousseau hätte dieser Gedanke nicht weiter verwundert. Aber jetzt sind wir soweit, ihre Ideen in spieltheoretische Modelle zu fassen, die mathematisch analysiert und experimentell getestet werden können. ■

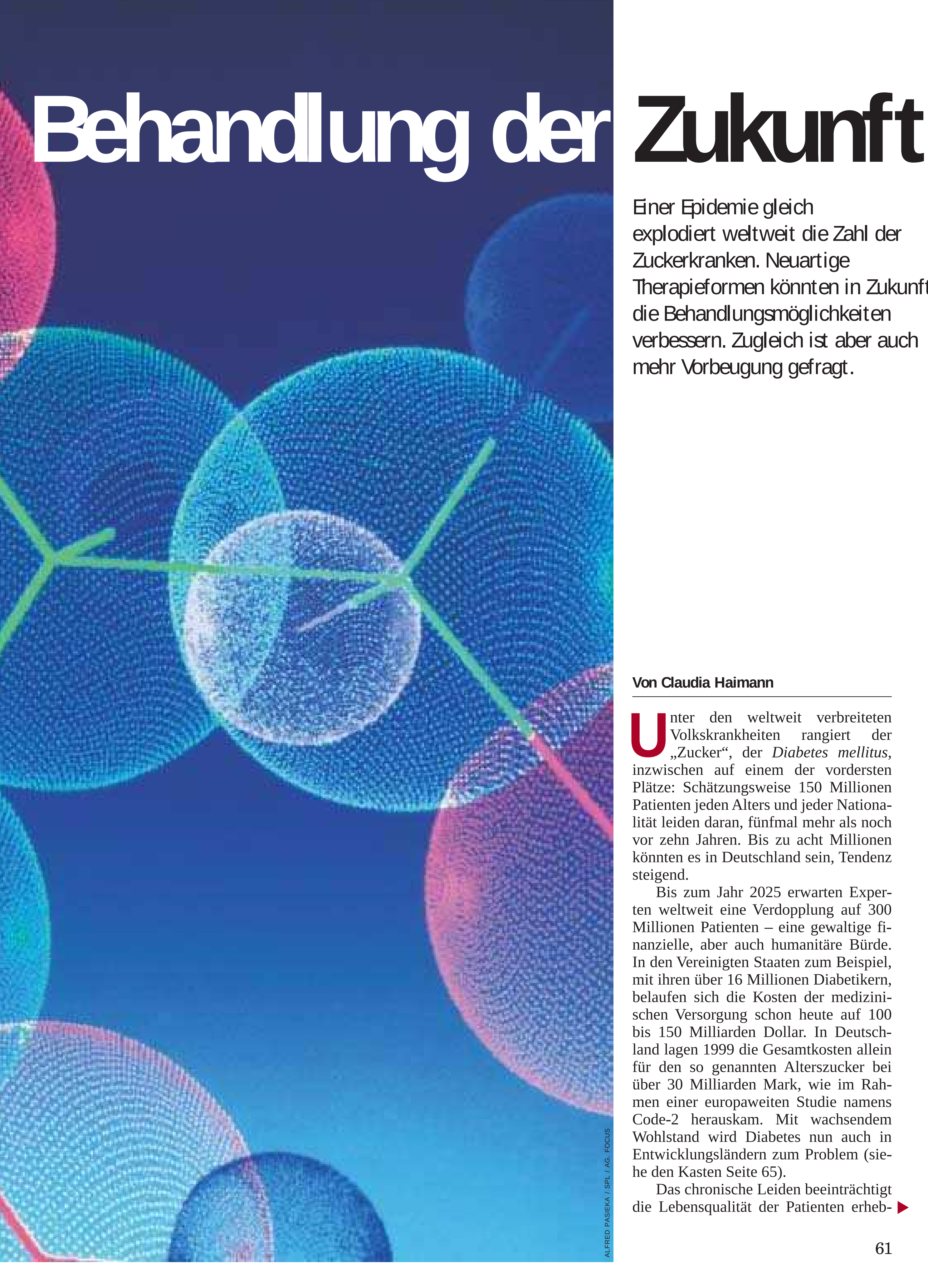
Karl Sigmund *ist Mathematik-Professor an der Universität Wien und Mitarbeiter des Instituts für Angewandte Systemanalyse in Laxenburg bei Wien. Er hat ausgiebig über evolutionäre Spieltheorie publiziert.* ***Ernst Fehr*** *ist Direktor des Instituts für Empirische Wirtschaftsforschung an der Universität Zürich. Er erforscht spieltheoretisch und experimentell, wie Organisationen, Märkte und Gesellschaften durch soziale Präferenzen und Rationalität geformt werden.* ***Martin A. Nowak*** *leitet das Programm für Theoretische Biologie am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey). Seine Forschungen reichen von der Ausbreitung von Infektionen über die Evolutionstheorie bis zur menschlichen Sprache. Sein jüngstes Buch ist „Virus Dynamics“ (mit Robert M. May).*

Die Diabetes



Insulin, hier ein Computermodell des Moleküls im Ausschnitt, reguliert den Zuckerhaushalt. Teils fehlt das Hormon bei Diabetes, teils sprechen die Körperzellen nicht mehr richtig darauf an.

Behandlung der Zukunft


ALFRED PASIEKA / SPL / AG. FOCUS

Einer Epidemie gleich explodiert weltweit die Zahl der Zuckerkranken. Neuartige Therapieformen könnten in Zukunft die Behandlungsmöglichkeiten verbessern. Zugleich ist aber auch mehr Vorbeugung gefragt.

Von Claudia Haimann

Unter den weltweit verbreiteten Volkskrankheiten rangiert der „Zucker“, der *Diabetes mellitus*, inzwischen auf einem der vordersten Plätze: Schätzungsweise 150 Millionen Patienten jeden Alters und jeder Nationalität leiden daran, fünfmal mehr als noch vor zehn Jahren. Bis zu acht Millionen könnten es in Deutschland sein, Tendenz steigend.

Bis zum Jahr 2025 erwarten Experten weltweit eine Verdopplung auf 300 Millionen Patienten – eine gewaltige finanzielle, aber auch humanitäre Bürde. In den Vereinigten Staaten zum Beispiel, mit ihren über 16 Millionen Diabetikern, belaufen sich die Kosten der medizinischen Versorgung schon heute auf 100 bis 150 Milliarden Dollar. In Deutschland lagen 1999 die Gesamtkosten allein für den so genannten Alterszucker bei über 30 Milliarden Mark, wie im Rahmen einer europaweiten Studie namens Code-2 herauskam. Mit wachsendem Wohlstand wird Diabetes nun auch in Entwicklungsländern zum Problem (siehe den Kasten Seite 65).

Das chronische Leiden beeinträchtigt die Lebensqualität der Patienten erheb- ▶

Zwei Hauptformen von Diabetes

Verschiedene Ursachen, fast gleiche Wirkung

Bei Diabetikern ist die Regulation des Kohlenhydrat- und Zuckerhaushalts durch das Hormon Insulin gestört. Dadurch steigt der Blutzuckerspiegel an. Insulin wird in der Bauchspeicheldrüse gebildet. Es reguliert die Zuckeraufnahme in die Körperzellen und hält den Blutzuckerspiegel konstant bei etwa 100 bis 110 Milligramm pro Deziliter Blutplasma.

Aufgrund verschiedener Entstehungsmechanismen unterscheidet die Weltgesundheitsorganisation zwei Hauptformen von Diabetes:

Typ 1, früher Jugend-Diabetes genannt, weil er in der Regel bereits im Kindes- und Jugendalter ausbricht.

Typ 2, auch Altersdiabetes oder insulinunabhängiger Diabetes.

Charakteristisch für Typ 1 ist ein Mangel an Insulin; das Immunsystem zerstört bei diesen Patienten die Insel-Zellen der Bauchspeicheldrüse, in denen das Hormon gebildet wird. Betroffene müssen sich lebenslang Insulin spritzen.

Typ 2 beruht darauf, dass vor allem die Zellen von Leber, Muskeln und Fettgewebe schlechter auf das Hormon ansprechen. Der Körper versucht, diese Insulin-Resistenz durch mehr Hormon auszugleichen, bis schließlich die Inselzellen erschöpft sind. Diese Form des Diabetes ist mit etwa neunzig Prozent der Fälle die bei weitem häufigere. Sie kommt vor allem bei Erwachsenen vor – in der Mehrzahl Übergewichtigen. Infolge geänderter Lebensgewohnheiten tritt er aber zunehmend selbst bei Kindern auf.

Ebenfalls unter Typ 2 fallen untergewichtige, zunächst nicht-insulinpflichtige Diabetiker, die in einem späteren Stadium der Erkrankung Insulin brauchen.



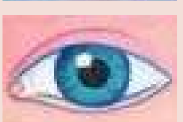
SATURN STILLS / SPL / AG. FOCUS

Ohne Insulin-Spritzen würde Jugend-Diabetes rasch tödlich enden.

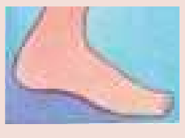
Wie Diabetes Organe schädigt



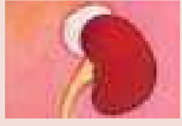
Herz
Bei Diabetikern bilden sich vermehrt arteriosklerotische Ablagerungen in den Herzkranzgefäßen. Herzinfarkt droht.



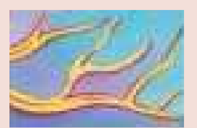
Augen
Der Mangel an sauerstoffreichem Blut am Augenhintergrund regt zur Neubildung von Blutgefäßen an, was die Netzhaut mit ihren Sehzellen schädigt. Erblindung droht.



Füße und Unterschenkel
Die Minderdurchblutung der unteren Extremitäten führt zur Bildung von Geschwüren (Gangrän), die sich infizieren und auch tiefe Gewebeschichten zerstören können. Amputationen drohen.



Nieren
Die Schädigung des Kapillarnetzes in der Niere vermindert die Filtrationsleistung und verursacht Bluthochdruck. Nierenversagen droht.



Nerven
An peripheren Nerven führt die Minderdurchblutung zu Schäden, die sich als Taubheitsgefühl und Nervenschmerzen äußern. Beginnende Geschwüre bleiben unbemerkt.

TIZIANA ZANETTI

lich. Diabetes schädigt Blutgefäße, mit teilweise schwerwiegenden Folgen: Erblindung, Nierenversagen und Amputationen drohen (siehe Kasten unten). In den USA haben Vertreter der Diabetes Research Working Group den US-Kongress aufgefordert, mehrere hundert Millionen Dollar für die Grundlagenforschung bereitzustellen, um neue Erkenntnisse über die Entstehung der Erkrankung und ihrer Folgeschäden zu gewinnen.

Vitamine senken das Diabetes-Risiko

Mit zunehmendem Einblick in die zellulären und molekularen Mechanismen wird mehr und mehr klar, dass es sich um eine generalisierte Erkrankung mit Funktionsstörungen verschiedenster Ursachen handelt. Zugleich verschwimmt allmählich die klassische Einteilung in Typ-1- und Typ-2-Diabetes, früher Jugend- und Alters-Diabetes genannt (siehe Kasten links). Für jede einzelne Form der Erkrankung muss daher untersucht werden, welche Moleküle auf welcher Stufe der Blutzuckerregulation mitwirken. Solche Erkenntnisse könnten dazu beitragen,

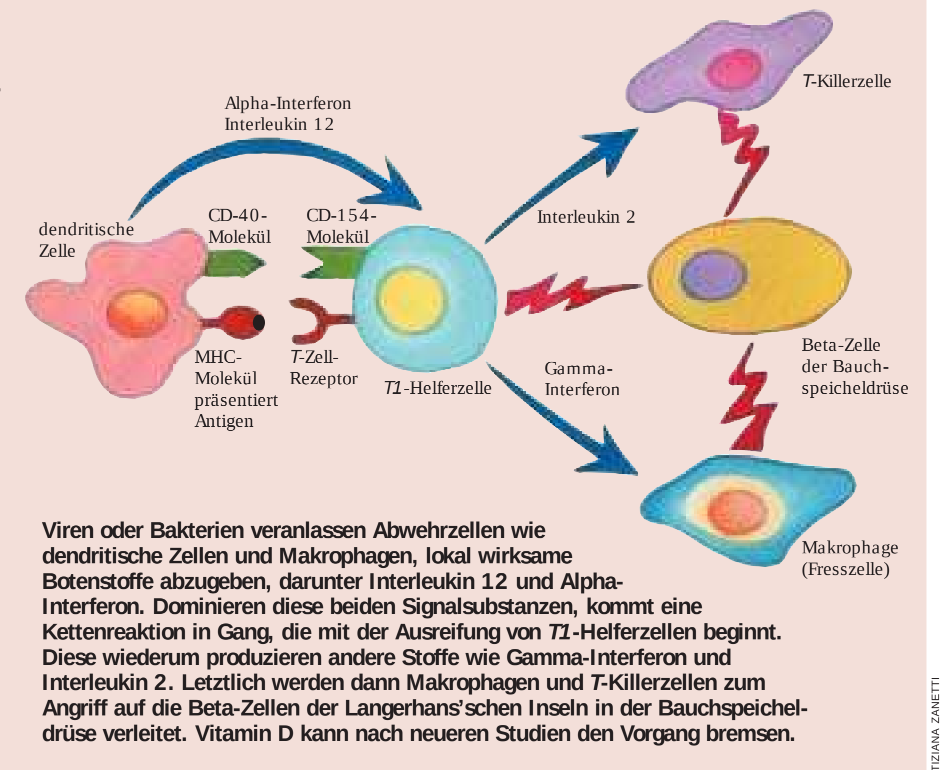
- ein individuell erhöhtes Diabetes-Risiko sicherer festzustellen,
- dringend benötigte Methoden zur Vorbeugung und Früherkennung zu entwickeln und
- den Verlauf der komplexen Erkrankung so zu beeinflussen, dass Folgeschäden möglichst gering bleiben.

Bei beiden Haupttypen von Diabetes spielen erbliche Komponenten mit, bei Typ 1 jedoch deutlich weniger als bei Typ 2. Nicht jedes Kind eines Diabetikers wird selbst zuckerkrank, erworbene Faktoren müssen offensichtlich hinzukommen. Ist zum Beispiel ein Elternteil an Typ 1 erkrankt, dann liegt die Wahrscheinlichkeit eines Kindes, daran zu erkranken, bei höchstens sieben Prozent. Sind beide Eltern betroffen, steigt das Risiko auf bis zu 40 Prozent, je nach Studie.

Nach heutiger Erkenntnis handelt es sich bei Typ 1 weit gehend um eine Autoimmunerkrankung: Das körpereigene Abwehrsystem greift fälschlicherweise die Sorte inselartig verteilter Zellen in der Bauchspeicheldrüse an, die das Hormon Insulin produzieren. Es ist für die Regulation des Blutzuckers unentbehrlich. Zu der fehlgeleiteten Reaktion könnten beispielsweise Umweltfaktoren wie Viren anregen. Als ein Hauptverdächtiger gilt das Rötelvirus, das während der Schwangerschaft von der Mutter auf das Ungeborene übertragen werden kann. Bei anderen Viren fehlen noch sichere Indizien.

Risiko Selbstzerstörung: Wie das Immunsystem Freund und Feind verwechselt

Weshalb greift das Immunsystem eines Typ-1-Diabetikers gerade die Beta-Zellen der Bauchspeicheldrüse an? Eine Möglichkeit: Virusinfektionen lösen eine Immunantwort aus, die sich versehentlich auch gegen Strukturen dieser zu Inseln geordneten Zellen richtet. Offenbar beeinflusst der jeweilige Gewebsverträglichkeitstyp (HLA) eines Individuums, ob körpereigene Moleküle wie Insulin oder auch die Enzyme Glutamat-decarboxylase und Tyrosin-phosphatase IA-2 vom Immunsystem als fremd gewertet werden. Antikörper gegen einzelne solche Moleküle sind im Serum schon Jahre vor Ausbruch eines Diabetes vom Typ 1 nachzuweisen. Je mehr verschiedene dieser Antikörper auftauchen, desto höher wird das Erkrankungsrisiko. Dies gibt Medizinern heute die Möglichkeit, Kinder aus Risikofamilien zu überwachen und rechtzeitig einzugreifen.



Viren oder Bakterien veranlassen Abwehrzellen wie dendritische Zellen und Makrophagen, lokal wirksame Botenstoffe abzugeben, darunter Interleukin 12 und Alpha-Interferon. Dominieren diese beiden Signalsubstanzen, kommt eine Kettenreaktion in Gang, die mit der Ausreifung von *T1*-Helferzellen beginnt. Diese wiederum produzieren andere Stoffe wie Gamma-Interferon und Interleukin 2. Letztlich werden dann Makrophagen und *T*-Killerzellen zum Angriff auf die Beta-Zellen der Langerhans'schen Inseln in der Bauchspeicheldrüse verleitet. Vitamin D kann nach neueren Studien den Vorgang bremsen.

TIZIANA ZANETTI

Bei den veranlagungsbedingten Faktoren ist die Beweislage sogar noch verwickelter. An der Blutzuckerregulation sind immerhin viele, womöglich bis zu hundert Gene beteiligt, die in komplexer Weise interagieren. Die bisher als verdächtig erkannten Gene lassen sich jedoch noch an den Fingern abzählen.

Ein Haupttäterkreis findet sich auf Chromosom 6 in einem Bereich, der für die Gewebeverträglichkeit bei Transplantaten bedeutsam ist. Er trägt unter anderem die Bauanweisung für HLA-Antigene (humane Leukocyten-Antigene); diese speziellen Proteine auf Zellen sind die Hauptziele von Abstoßungsreaktionen. Die Gene dafür kommen in mehreren ähnlichen Formen in der Bevölkerung vor. Manche der Varianten gehen mit erhöhten, manche mit geringerem Diabetes-Risiko einher.

Anfang vergangenen Jahres berichteten Grant Morahan und seine Mitarbeiter vom Royal Melbourne Hospital, Victoria (Australien), sie hätten eine Erbanlage auf Chromosom 5 identifiziert, die mit der Entstehung von Diabetes in enger ursächlicher Beziehung steht. Das Gen codiert für ein „Immunhormon" namens Interleukin 12B (kurz IL-12B). Die Substanz beschleunigt bei normalgewichtigen Mäusen ohne genetische Diabetes-Disposition den Krankheitsverlauf, und zwar über eine Kette von Reaktionen, die letztlich zur Zerstörung der Insulin produzierenden Zellen führt. IL-12B begünstigt die Entwicklung von immunologischen Helferzellen, welche die Aktivität von anderen Abwehrzellen steuern, die für die Angriffe auf die Beta-Zellen der Inseln unmittelbar verantwortlich sind (siehe Kasten oben). Durch eine Sequenzanalyse der IL-12B-Gene von 250 Geschwisterpaaren konnten die australischen Wissenschaftler nachweisen, dass eine bestimmte punktuelle Mutation das Risiko für Diabetes erhöht. Die Veränderung eines einzelnen Genbausteins ließ die Produktion von Interleukin 12 über das Normalmaß steigen.

„Diese und andere Ergebnisse zeigen", erklärt Luciano Adorini, Forschungsleiter in den Labors der Firma Roche in Mailand, „dass ein ähnlicher Mechanismus wie bei den Mäusen auch beim Menschen zum Absterben der Inselzellen durch programmierten Zelltod führt." Der Prozess beginnt schon Monate bis Jahre, bevor die ersten Symptome der Zuckerkrankheit auftreten. Tun sie es schließlich, sind bereits etwa siebzig Prozent der Inseln zerstört. Außerdem besteht offenbar ein Zusammenhang zwischen der Menge an gebildetem IL-12 und dem Risiko für einen Typ-1-Diabetes. Mit Hilfe der charakteristischen Mutation könnte die Diabetes-Diagnose schon früh gestellt und eine Immuntherapie eingeleitet werden. Somit wäre es möglich, bereits zu einem Zeitpunkt einzugreifen, zu dem die Autoimmunprozesse noch ohne erkennbare Symptome ablaufen und noch relativ viele Inselzellen am Leben sind.

„Damit könnten", erläutert Adorini, „langfristige Komplikationen vermieden

STECKBRIEF

➤ Altersdiabetes wird von Ärzten wie auch von Patienten oft nicht ernst genug genommen, mit fatalen Folgen.

➤ Angesichts der weltweit dramatisch steigenden Zahl von Diabetikern forden Experten ein zweigleisiges Vorgehen: zum einen vorbeugende Maßnahmen gegen die Wohlstandskrankheit, und das ironischerweise vor allem auch in der Dritten Welt, wo Experten den stärksten Anstieg befürchten.

➤ Zum anderen fordern sie verbesserte Behandlungsmöglichkeiten. Denn bisherige Medikamente können den Zuckerhaushalt bislang nicht fein genug ausbalancieren. Ideal wäre ein biologischer Ersatz für die geschädigten Insulin-Produzenten.



JOHN BAVOSI / SPL / AG. FOCUS

Eine Insulin produzierende Zelle speichert das erzeugte Hormon als Vorstufe (blaue Kugeln) in Bläschen. Diese entleeeren ihre Fracht bei Bedarf in ein benachbartes Blutgefäß (graue Röhre). Statt die Produktion bei Altersdiabetes künstlich zu steigern, sollen neue Medikamente Körperzellen leichter auf Insulin ansprechen lassen.

werden, wie etwa Schäden am Augenhintergrund, die den Patienten erblinden lassen.“ Zu verhindern wäre so auch die gefährliche Sklerose der Nierenkörperchen, die zum Nierenversagen führt. „IL-12 könnte also ein wichtiger Angriffspunkt für neue Therapieformen werden.“

Die Gruppe um Adorini arbeitet an diesem Ziel. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Gabe von Vitamin D3 den Krankheitsprozess bei Mäusen mit Diabetes-Neigung aufhalten kann. Es vermindert einerseits die Produktion von IL-12 und fördert andererseits Zellen, die dem Zerstörungswerk entgegenwirken. Der epidemiologischen Studie Eurodiab von 1999 zufolge kann die Verabreichung von Vitamin D3 das Risiko einer Diabetes-Erkrankung beim Menschen senken. Es ist in Nahrungsmitteln enthalten, etwa in Vollmilch, ebenso in Vitaminpräparaten, die zur Verabreichung an Risikogruppen geeignet wären.

Die Forscher der Roche-Labors in Mailand untersuchen mittlerweile selektiv wirksame D3-Analoga, also Abkömmlinge des Vitamins, die bei verbesserter Wirkung auf das Immunsystem den Calcium-Haushalt, für den die Substanz bekanntermaßen nötig ist, weniger stark beeinflussen. Solche neuartigen Präparate könnten auch zusammen mit anderen Medikamenten verabreicht werden, die Abstoßungsreaktionen gegen transplantierte Ersatz-Inselzellen verhindern sollen.

Die so genannte Inselzell-Transplantation könnte in den nächsten zehn Jahren einem ausgewählten Patientenkreis, der auf Insulin angewiesen ist, eine Therapieoption bieten. Mit den heute verfügbaren Medikamenten lässt sich der Zuckerhaushalt nicht genau genug regulieren, um die gravierenden Spätschäden zu vermeiden, unter denen etwa zehn Prozent der Diabetiker leiden. Daher suchen Forscher schon seit einigen Jahren nach Möglichkeiten, Insulin produzierende Zellen zu ersetzen: entweder durch Transplantation einer Bauchspeicheldrüse (Pankreas) oder durch Infusion isolierter Inseln.

Hohe Erwartungen an Inselzell-Transplantation

„Beide Strategien haben sich als wirksam erwiesen, sind aber bisher nur bei wenigen Patienten anwendbar“, erklärt Antonio Secchi, Professor für Innere Medizin am Istituto scientifico San Raffaele der Universität Mailand. „Die Organtransplantation funktioniert gut, ist allerdings mit Risiken behaftet wie dem chirurgischen Eingriff selbst, der Abstoßungsgefahr und den Nebenwirkungen der langfristig einzunehmenden Medikamente, die das Immunsystem unterdrücken sollen.“ Infolge dieser Immunsuppression treten leichte Infektionen und Tumoren auf.

„Die Transplantation von Pankreas-Inseln ist auf dem Papier die ideale Lösung“, meint Secchi, „da dieser Eingriff viel weniger belastet.“ Dabei wird dem Spender Pankreas-Gewebe entnommen, die Inseln werden isoliert und dem Empfänger in die Pfortader injiziert. Über diesen Weg gelangen die transplantierten Drüsenzellen in die Leber als Ersatzlebensraum, siedeln sich dort an und beginnen mit der Hormonproduktion. Da die Prozedur mehrmals wiederholt werden muss, für einen Empfänger also Pankreas-Gewebe von zwei bis vier Spendern benötigt wird, ist der Aufwand beträchtlich. Außerdem müssen auch bei dieser Methode Medikamente gegeben werden, die eine Abstoßung unterdrücken. „Daher kommen nur Diabetes-Patienten in Frage“, gibt Secchi zu bedenken, „die bereits andere Organtransplantate erhalten haben oder bei denen eine Nierentransplantation ansteht; der Vorteil der Insulin-Unabhängigkeit wiegt eben die Risiken der Immunsuppression nicht auf.“

Altersdiabetes – eine weltumspannende Epidemie

Alterszucker heißt die Erkrankung im Volksmund und als ebenso „altersbedingt" harmlos haben viele Betroffene und Ärzte sie bislang betrachtet. *Diabetes mellitus* vom Typ 2, so der wissenschaftliche Name, diagnostizierten Mediziner bislang am häufigsten bei Menschen zwischen dem 50. und 60. Lebensjahr. Mittlerweile tritt der vermeintliche Alterszucker immer öfter bereits vor dem 40. Lebensjahr auf, mitunter sogar schon im Kindes- und Jugendalter.

Diese erstaunliche „Verjüngung" beobachten Epidemiologen rund um den Globus, selbst in der Dritten Welt. Besonders drastisch zeigt sie sich in Japan, wo der „Alterszucker" mittlerweile die häufigste Diabetesform bei Kindern ist. Weltweit hat der Typ 2 in den letzten beiden Jahrzehnten dramatisch zugenommen – Tendenz weiter steigend, sodass Fachleute mittlerweile von einer regelrechten Diabetes-Epidemie sprechen.

„*Diabetes mellitus* wurde lange Zeit als Krankheit mit geringer Bedeutung für die Weltgesundheit angesehen," schrieben australische und britische Diabetesforscher kürzlich in der Fachzeitschrift *Nature*: „Heute nimmt er einen der vorderen Plätze in der Rangliste der größten Gesundheitsbedrohungen des 21. Jahrhunderts ein." Die Wissenschaftler rechnen damit, dass die Anzahl der Diabetiker bis zum Jahr 2025 auf 300 Millionen wächst.

Der Grund für diese bedrohliche Entwicklung ist, dass sich immer mehr Menschen zu üppig ernähren und zu wenig bewegen. Denn Bewegungsmangel und Übergewicht sind die beiden wichtigsten Risikofaktoren, die einen Diabetes vom Typ 2 ausbrechen lassen, wenn eine erbliche Veranlagung dafür besteht: Die „überfütterten" Körperzellen sprechen nicht mehr gut auf Insulin an; diese Insulin-Resistenz versucht der Körper durch Überproduktion des Hormons zu überwinden, bis die Inselzellen versagen.

Veranlagungen spielen hier wesentlich stärker mit als beim Typ 1. Die Wahrscheinlichkeit, als Erwachsener an Typ-2-Diabetes zu erkranken, liegt bei vierzig Prozent, wenn ein Elternteil schon daran leidet; sogar bei sechzig Prozent, wenn beide Eltern betroffen sind. Schätzungsweise jeder Vierte in Deutschland trägt eine erbliche Veranlagung, und etliche Menschen haben bereits „Alterszucker", ohne es zu merken.

An der zweiten Hauptform, dem so genannten Jugend- oder Typ-1-Diabetes, leiden weltweit nur fünf bis zehn Prozent aller Diabetes-Patienten. Anders als beim Typ 2 ist das Körpergewicht in der Regel normal, und Lebensstilfaktoren wie übermäßiges Essen oder mangelnde Bewegung haben keinen Einfluss.

Diabetes vom Typ 1 muss von Anfang an mit Insulin behandelt werden – sonst verläuft die Erkrankung schnell tödlich. Typ-2-Diabetiker haben dagegen vieles selbst in der Hand. Im Vordergrund steht das Abnehmen; es gilt, die Ernährung umzustellen und sich mehr zu bewegen. Mit einer gesünderen Lebensweise allein können viele Typ-2-Diabetiker ihren gestörten Stoffwechsel bereits wieder normalisieren. Reicht dies nicht, verordnen die Ärzte Tabletten – so genannte orale Antidiabetika. Erst an dritter Stelle steht eine Insulin-Therapie, entweder kombiniert mit oralen Antidiabetika oder allein.



Die Wissenschaftler arbeiten derzeit an Programmen und Studien, um die anrollende Welle an Typ-2-Diabetes zurückzudrängen. Ihnen ist es beispielsweise gelungen, anhand der Stoffwechsellage zu erkennen, ob sich mit großer Wahrscheinlichkeit ein Typ-2-Diabetes anbahnt. Die Betroffenen haben, wenn sie viel Süßes auf einmal essen, einen erhöhten Blutzuckerspiegel, der zwischen den normalen und den bei Diabetikern gemessenen Werten liegt. Etwa vierzig Prozent dieser weltweit schätzungsweise 200 Millionen Risikopatienten entwickeln innerhalb von fünf bis zehn Jahren einen Diabetes vom Typ 2.

Bei einer kürzlich abgeschlossenen amerikanischen Studie (Diabetes Prevention Program) konnte die Erkrankungswahrscheinlichkeit dieser Hochrisikopatienten durch Diät und regelmäßigen Sport um nahezu sechzig Prozent gesenkt werden. Das bewährte orale Antidiabetikum Metformin reduzierte, vorbeugend eingenommen, das Risiko um rund dreißig Prozent. Das Mittel hat vielfältige Wirkungen, unter anderem verringert es die Resistenz gegen Insulin. Dadurch nehmen die Körperzellen mehr Zucker auf, sodass der Blutzuckerspiegel sinkt. Derzeit prüfen die Wissenschaftler, ob auch andere direkt oder indirekt blutzuckersenkenden Medikamente den Ausbruch der Erkrankung verhindern oder zumindest verzögern könnten.

Eine neue, noch nicht zugelassene Gruppe von Antidiabetika sind die so genannten Insulin-Sensitizer. Solche Mittel fördern die Aufnahme von Zucker in Muskel- und Fettgewebe, ohne dass der Körper mehr Insulin braucht. Entwickelt werden zudem inhalierbare Insuline, um die lästigen Injektionen zu reduzieren.

Der „Alterszucker" und seine Begleiterscheinungen, so betonen Experten, müsse von Ärzten und Patienten genauso ernst genommen werden wie der Typ-1-Diabetes, drohen doch bei später, inkonsequenter Behandlung schwere Folgeerkrankungen (Kasten Seite 62 unten). Weitere Risikofaktoren wie Bluthochdruck und zu hoher Cholesterin-Spiegel gilt es ebenfalls konsequent anzugehen.

Bei allen notwendigen und berechtigten Maßnahmen, den Typ-2-Diabetes und seine epidemischen Ausmaße zu bekämpfen, dürfe eines nicht vergessen werden, so die *Nature*-Autoren: Dieser Typ sei nur das Symptom eines viel größeren und grundsätzlicheren Problems – dass Veränderungen der Umwelt und im Lebensstil sich immer bedenklicher auf die menschliche Gesundheit auswirken.

Claudia Eberhard-Metzger *ist Wissenschaftsjournalistin mit Schwerpunkt Medizin.*

Zelltherapie des Diabetes

Woher Ersatzzellen nehmen?

Transplantierbare Inselzellen sind ein knappes Gut, nicht nur weil es an Spendern mangelt. Die Insulin produzierenden Zellen stellen nur etwa ein Prozent am Gesamtvolumen des Organs. Deshalb suchen Forscher nach alternativen Quellen für Insel-Transplantate.

Ihr Ziel: Zell-Linien herzustellen, die bei steigendem Zuckergehalt der Umgebung Insulin abgeben. Als mögliche Alternativen untersucht werden derzeit Pankreas-Inseln vom Schwein, menschliche Stammzellen sowie Zellen des Pankreas-Gangs. Bei Schweinezellen besteht allerdings die Gefahr, dass unerkannt Retroviren übertragen werden könnten, die sich irgendwo ins Erbgut integrieren. Die oberste Gesundheitsbehörde der USA ließ daher entsprechende Studien einstellen, bis anhand neuer Daten die Sicherheit der Transplantat-Empfänger gewährleistet werden kann.

Aus Embryonen oder Feten gewonnene menschliche Stammzellen haben zwar die Fähigkeit, sich zu Beta-Zellen zu entwickeln. Allerdings sind viele der dazu notwendigen Signalsubstanzen, vor allem beim Menschen, noch nicht bekannt. Im vergangenen Jahr berichtete Ronald McKay von den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) immerhin, seine Arbeitsgruppe habe erstmals aus embryonalen Stammzellen der Maus reife Zellaggregate gewonnen, die in Aufbau und Funktion den Inseln der Bauchspeicheldrüse (Pankreas) ähneln.

Manipulierte Zellen des Pankreas-Gangs erscheinen heute als aussichtsreichste Quelle für Insel-Transplantate. Da Ärzte sie dem Kranken selbst entnehmen würden, gibt es keine immunologischen Abstoßungsreaktionen. Auch ethische Probleme, wie bei Verwendung von embryonalen und fetalen Geweben, sind nicht zu berücksichtigen. Da die Zellen schon aus dem richtigen Organ stammen, ist der Weg zu ihrer Umprogrammierung in Beta-Zellen kürzer als bei Stammzellen. Verfahren hierfür sind allerdings noch zu entwickeln.



SPL / AG. FOCUS

Ersatzzellen müssten wie die Originalzellen Insulin (rote Flecken) speichern und bei Bedarf abgeben können.

Außerdem beeinträchtigen die Mittel gegen eine Abstoßung ausgerechnet auch die Funktion der Inselzellen sowie die Reaktion der Gewebe auf Insulin. Entsprechend vermeldet das International Islet Cell Transplantation Registry, dass nur etwa zehn Prozent der transplantierten Patienten ein Jahr nach dem Eingriff mit weniger Insulin auskommen als vor der Transplantation.

Am Krankenhaus San Raffaele dagegen wurden seit 1989 rund sechzig Transplantationen vorgenommen. Etwa 60 bis 65 Prozent der Patienten brauchten danach kein Insulin mehr. „Dies ist ein gutes Resultat“, betont Secchi, „auch wenn nie sicher ist, wie lange die Inselzellen dann funktionieren, manchmal Monate, manchmal einige Jahre.“

Weshalb werden trotzdem so viele Erwartungen in die Inselzell-Transplantation gesetzt? Im Jahr 2000 berichteten kanadische Forscher der Universität von Alberta in Edmonton über erste Erfolge mit einer modifizierten, weniger aggressiven Strategie, um Abstoßungsreaktionen zu unterdrücken. Sie ähnelt der bei Knochenmark-Transplantationen üblichen Methode: eine kurzfristige Immunsuppression, gefolgt von einer Phase der Toleranz-Induktion, während derer der Körper lernt, die fremden Zellen wie eigene zu behandeln. Sieben nach diesem Schema behandelte Patienten, so berichteten James Shapiro und seine Kollegen damals, waren ein Jahr nach der Transplantation noch immer unabhängig von Insulinspritzen. Diese Daten wurden dann auf einem internationalen Kongress bestätigt: Von 15 Patienten, die zwei Jahre nach der Transplantation erneut untersucht wurden, benötigten zwölf noch immer kein Insulin.

Große Hoffnung: umprogrammierte Zellen

Die kanadischen Wissenschaftler haben nicht nur die medikamentöse Unterdrückung des Immunsystems optimiert, indem sie auf Substanzen wie Corticoide und Ciclosporin verzichten, die leider Diabetes fördern. Sie verbesserten außerdem die Prozedur zur Gewinnung, Reinigung und Infusion der Inselzellen. Das neue kanadische Verfahren ist zwar auch nicht frei von Komplikationen, stellt jedoch einen erfreulichen Fortschritt dar. Die Aussichten werden so günstig eingeschätzt, dass die US-amerikanischen National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) mehrere Millionen Dollar für eine große Studie zur Verfügung gestellt haben. An ihr nehmen mehrere Transplantationszentren teil, darunter in Europa die Universitätskliniken von Genf und Gießen sowie das Centro del San Raffaele in Mailand, wo im März 2001 die erste Transplantation nach der neuen Methode durchgeführt wurde.

Der Mangel an Spenderorganen steht allerdings einer breiten Anwendung des Verfahrens entgegen. Deshalb versuchen Forscher in aller Welt, auf gentechnischem Wege tierische Inselzellen zu „vermenschlichen“ oder andere Zellen des menschlichen Körpers zu einer geregelten Produktion von Insulin zu bewegen (siehe Kasten oben). Auch Stammzellen sind in der Diskussion. Die Diabetes-Medizin ist jedenfalls in Bewegung. ■

***Claudia Haimann**, Dozentin für allgemeine Physiologie an der Universität Turin, erforschte früher neurobiologische Fragen an Institutionen in Italien, Frankreich, den Vereinigten Staaten und der Schweiz. Inwischen arbeitet sie an populärwissenschaftlichen Publikationen.*

Literaturhinweise

Appropriateness and timing of kidney and/ or pancreas transplants in type 1 and type 2 diabetes. Von Amy L. Friedman in: Advances in Renal Replacement Therapy, Bd. 8, Nr. 1, S. 70, 2001.

Global and societal implications of the diabetes epidemic. Von Paul Zimmet et al. in: Nature, Bd. 414, S. 782, 2001.

Islet and stem cell transplantation for treating diabetes. Von P. Serupp et al. in: British Medical Journal, Bd. 322, S.29, 2001.

*Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www. spektrum.de** unter „aktuelles Heft“.*

ZUKUNFT DER MENSCHHEIT

Der Engpass

Durch übermäßige Vermehrung und Raubbau an der Natur droht die Menschheit sich selbst und die gesamte Erde in den Abgrund zu stürzen. Noch in diesem Jahrhundert wird ein Versorgungsengpass entstehen, der nur durch eine radikale Umkehr zu meistern ist.

ALLE ABBILDUNGEN: DAVE CUTLER

Von Edward O. Wilson

Das zwanzigste Jahrhundert war eine Epoche des exponentiellen wissenschaftlichen und technischen Fortschritts, der Befreiung der Künste durch einen überschäumenden Modernismus und der zunehmenden Verbreitung von Demokratie und Menschenrechten in der Welt. Gleichzeitig war es ein finsteres, unmenschliches Jahrhundert der Weltkriege, des Völkermords und totalitärer Ideologien, die der Weltherrschaft gefährlich nahe kamen. In all diesem Aufruhr gelang es der Menschheit gleichwohl, die natürliche Umwelt bedenklich zu dezimieren und die nicht erneuerbaren Ressourcen der Erde mit unbekümmerter Hemmungslosigkeit auszubeuten. Damit beschleunigten wir die Vernichtung ganzer Ökosysteme und die Ausrottung Tausender von Arten, die schon seit Jahrmillionen die Erde bevölkert hatten. Wenn es ökologische Grenzen für das wirtschaftliche Wachstum auf der Erde gibt – und dies ist zweifelsohne der Fall –, dann waren wir meistens zu beschäftigt, um dies zu bemerken.

Mit dem Beginn des neuen Jahrhunderts ist die Menschheit allmählich aus ihrem Delirium erwacht. In einer zunehmend post-ideologisch geprägten Atmosphäre sind wir vielleicht zur Umkehr bereit, bevor der Planet unwiderruflich zerstört ist. Es ist jedenfalls höchste Zeit, dass wir uns Klarheit über den Zustand der Erde verschaffen und analysieren, was erforderlich ist, um künftig allen Menschen auf Dauer ein befriedigendes Leben zu ermöglichen. Die Frage des Jahrhunderts ist: Wie finden wir am besten zu einer Kultur der Nachhaltigkeit – für uns selbst und für die uns am Leben erhaltende Biosphäre?

Angesichts einer Weltbevölkerung von mehr als sechs Milliarden Menschen und einer Zuwachsrate, die bis Mitte des Jahrhunderts eine Weltbevölkerung von acht Milliarden oder mehr erwarten lässt, verringern sich die pro Kopf zur Verfügung stehenden Mengen an Süßwasser und Ackerland auf ein Niveau, das von Experten als bedenklich eingestuft wird. Der ökologische Fußabdruck – der auf jeden Menschen entfallende



Durch ihre rasch wachsende Zahl und ihre Ansprüche setzt die Menschheit den Baum des Lebens auf unserem Planeten einer kritischen Belastungsprobe aus.

durchschnittliche Anteil an fruchtbarem Land und Küstengewässern zur Befriedigung seiner grundlegenden Bedürfnisse wie Nahrung, Wasser, Wohnen, Energie, Transport, Handel und Abfallaufnahme – beträgt ungefähr 1 Hektar in den Entwicklungsländern und 9,6 Hektar in den Vereinigten Staaten. Über die gesamte Weltbevölkerung gemittelt, beträgt er 2,1 Hektar. Wollten alle Menschen auf der Welt das derzeitige Konsumniveau in den Vereinigten Staaten erreichen, würde man beim heutigen Stand der Technik vier weitere Planeten wie die Erde benötigen. Auch wenn die fünf Milliarden Menschen in den Entwicklungsländern vielleicht gar nicht dieses verschwenderische Niveau anstreben, haben sie sich doch in ihrem Bemühen, zumindest einen bescheidenen Lebensstandard zu erzielen, dem Angriff der industrialisierten Welt auf die letzten natürlichen Lebensräume dieser Erde angeschlossen.

Homo sapiens ist zu einer geophysikalischen Kraft geworden und stellt damit die erste Spezies in der Geschichte des Planeten dar, die sich dieser zweifelhaften Auszeichnung rühmen kann. Wir haben den Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre auf den höchsten Stand seit mindestens 200 000 Jahren getrieben, wir haben den Stickstoffkreis-

lauf aus dem Gleichgewicht gebracht und zu einer globalen Erwärmung beigetragen, die letztlich auf der ganzen Welt Unheil anrichten wird.

Um es auf den Punkt zu bringen: Das Jahrhundert der Umwelt hat begonnen – ein Jahrhundert, in dem die unmittelbare Zukunft als Engpass aufgefasst werden muss. Wissenschaft und Technik, gepaart mit steinzeitlicher Sturheit und Mangel an Einsicht, haben uns in die heutige Situation hineinmanövriert. Wissenschaft und Technik, verbunden mit einer gehörigen Portion Weitblick und moralischem Mut, sind nun erforderlich, um uns zu helfen, den Engpass zu überwinden und einen Weg aus der Krise zu finden.

„Moment mal!" Dies ist die Stimme des wachstumsgläubigen Ökonomen. Hören wir ihm zu. Er schreibt für Wirtschaftsblätter wie *The Economist* und *The Wall Street Journal* und verfasst Weißbücher für das Competitive Enterprise Institute und andere politisch konservative Denkfabriken. Ich werde diese Quellen benutzen, um seine Haltung so ehrlich wie möglich zusammenzufassen, wobei ich mir der Gefahr der Stereotypisierung durchaus bewusst bin. Zur Verdeutlichung der verschiedenen Positionen treffen sich ein Ökonom und ein Ökologe zu einem konstruktiven Dialog. Wir gehen von der Annahme aus, dass beide die Erhaltung des Lebens auf unserem Planeten als ihr gemeinsames Ziel verfolgen.

Wollten alle Menschen auf der Welt das derzeitige Konsumniveau in den USA erreichen, würde man beim heutigen Stand der Technik vier weitere Planeten wie die Erde benötigen

Der Ökonom konzentriert sich in seiner Betrachtung auf Produktion und Konsum. Dies, so seine Argumentation, sind die Grundbedürfnisse der Welt. Er hat natürlich Recht. Jede Art lebt von Produktion und Verbrauch. Der Baum wächst und verbraucht Nährstoffe und Sonnenlicht. Der Leopard jagt und „verbraucht" Wild. Und der Landwirt rottet beide aus, um Getreide anzubauen – wiederum für den Verbrauch. Das Weltbild des Ökonomen beruht auf präzisen Modellen rationaler Entscheidung sowie auf relativ kurzfristigen Zeithorizonten. Seine Parameter sind das Bruttosozialprodukt, die Handelsbilanz und der Wettbewerbsindex. Er sitzt im Vorstand großer Unternehmen, reist nach Washington und tritt gelegentlich in Talkshows im Fernsehen auf. Die Erde, so behauptet er, sei unendlich fruchtbar und ihre Kapazitäten würden noch nicht voll ausgeschöpft.

Der Ökologe vertritt eine andere Auffassung. Er verweist auf unhaltbare Ernteerträge, sinkende Grundwasserspiegel und bedrohte Ökosysteme. Auch seine Stimme findet in Regierungskreisen und der Industrie Gehör, wenn auch nur in geringem Maße. Er sitzt im Vorstand gemeinnütziger Stiftungen, schreibt für Wissenschaftsmagazine wie *Scientific American* und wird manchmal nach Washington berufen. Die Erde, so behauptet er, sei erschöpft und stecke in einer tiefen Krise.



Das Credo des Ökonomen

„Jetzt entspannen Sie sich erst einmal. Trotz der Weltuntergangsprophezeiungen der letzten beiden Jahrhunderte erfreut sich die Menschheit gegenwärtig eines beispiellosen Wohlstands. Gewiss gibt es Umweltprobleme, doch sind diese nicht unlösbar. Betrachten Sie sie als vorübergehende Begleiterscheinungen des Fortschritts, die beseitigt werden müssen. Die globale wirtschaftliche Situation ist positiv. Das Bruttosozialprodukt der Industrienationen ist weiter gestiegen. Trotz Rezession holen die aufstrebenden asiatischen Volkswirtschaften Nordamerika und Europa gegenüber auf. Überall auf der Welt verzeichnen Industrie und Dienstleistungssektor kontinuierliche Zuwächse. Seit 1950 sind das Pro-Kopf-Einkommen und die Fleischproduktion gestiegen. Auch wenn die Weltbevölkerung in demselben Zeitraum mit einer Rate von 1,8 Prozent pro Jahr explosionsartig gewachsen ist, konnte die Getreideproduktion, die in den ärmeren Ländern der Welt über die Hälfte des Kalorienbedarfs deckt und die traditionell als Beispiel für weltweite Ernteerträge herangezogen wird, mit dieser Entwicklung mehr als Schritt halten. Sie ist zwischen 1950 und 1980 von 275 Kilogramm pro Kopf auf 370 Kilogramm gestiegen. Die Wälder der Industrieländer regenerieren sich heute fast ebenso schnell, wie sie abgeholzt werden. Und obwohl die Holzvorräte in der übrigen Welt stark zurückgehen – was zugegebenermaßen ein ernstes Problem darstellt –, ist in absehbarer Zukunft keine globale Knappheit zu erwarten. Als Retter in der Not ist hier die Forstwirtschaft eingesprungen: Mehr als zwanzig Prozent der für industrielle Zwecke benötigten Hölzer stammen heute aus Baumplantagen.

Mit dem Wirtschaftswachstum nimmt auch der soziale Fortschritt zu. Die Alphabetisierung schreitet voran und damit die Befreiung und Gleichstellung der Frau. Die Demokratie, der Goldstandard politischer Systeme, setzt sich in immer mehr Ländern durch. Die durch den Computer und das Internet angetriebene Revolution in der Kommunikation hat zu einer Globalisierung des Handels und einer friedlicheren internationalen Kultur beigetragen.

Seit zwei Jahrhunderten überschattet das von Malthus beschworene Schreckgespenst der Übervölkerung die Träume der Zukunftsforscher. Wenn die Bevölkerung weiterhin exponentiell wüchse, so mahnen die Weltuntergangspropheten, reichten die begrenzten Ressourcen der Welt nicht mehr aus, um die Menschheit zu ernähren. Hungersnöte, Chaos und Kriege wären die Folge. Regional begrenzt, trat dieses Szenarium in der Tat gelegentlich ein, doch war dies weniger ein Resultat der malthusischen Bevölkerungstheorie als vielmehr das Ergebnis politischer Misswirtschaft. Menschliche Erfindungsgabe hat schon immer Mittel und Wege gefunden, um die wachsende Bevölkerung ausreichend zu versorgen und der Bevölkerungsmehrheit einen angemessenen Lebensstandard zu ermöglichen. Ein Paradebeispiel dafür ist die ‚grüne Revolution', mit deren Hilfe es gelungen ist, die Ernteerträge in den Entwicklungsländern dramatisch zu erhöhen. Dieses Beispiel lässt sich mit den neuen Technologien wiederholen. Warum sollten wir daran zweifeln, dass menschlicher Unternehmungsgeist den gegenwärtigen Aufwärtstrend auch künftig fortsetzen kann?

Mit schöpferischer Kraft und harter Arbeit haben wir die Umwelt zum Wohle der Mensch-

heit umgestaltet. Wir haben eine ungezähmte, unwirtliche Natur in einen Garten verwandelt. Es ist das Schicksal der Erde, dem Menschen untertan zu sein. Die schädlichen Nebenwirkungen dieser Herrschaft können mit zunehmendem Fortschritt gemildert und rückgängig gemacht werden.“

Der Ökologe warnt

„Es ist zwar richtig, dass sich die Lebensbedingungen des Menschen in vielerlei Hinsicht dramatisch gebessert haben, doch ist dies nur die eine Seite der Medaille. Sie gehen in Ihrem Weltbild davon aus, dass die Menschheit ein Paradies geschaffen habe, das sich durch die wirtschaftlichen Prozesse von selbst am Leben erhält. Dies mag zutreffend sein – aber nur, wenn man einen unendlich großen und beliebig formbaren Planeten voraussetzt. Sie werden jedoch zugeben müssen, dass die Erde endlich ist und die ökologischen Probleme zunehmend prekärer werden. Um qualifizierte Vorhersagen über die langfristige wirtschaftliche Zukunft der Welt machen zu können, darf man sich nicht allein auf Daten wie das Bruttosozialprodukt oder die Jahresberichte von Unternehmen verlassen. Wenn wir ein realistisches Bild vom Zustand der Welt gewinnen wollen, müssen wir auch die Berichte von Ressourcenexperten und Umweltökonomen heranziehen. Sie sind es, die eine objektive Bilanz erstellen, indem sie in ihre Rechnung auch die Kosten des Wirtschaftswachstums einbeziehen.

Diese neue Riege von Statistikern verweist darauf, dass wir es uns nicht länger leisten können, die Abhängigkeit der Wirtschaft und des sozialen Fortschritts von den ökologischen Ressourcen zu ignorieren. Es ist die Qualität des wirtschaftlichen Wachstums unter Berücksichtigung der verbrauchten natürlichen Ressourcen, die langfristig zählt, nicht der reine Ertrag in Form von Produkten und Geld. Ein Land, das seine Wälder abholzt, seine Grundwasserreserven ausbeutet und seinen Ackerboden der Erosion preisgibt, ohne die Folgekosten abzuschätzen, verschließt sich der Realität und geht einer ungewissen wirtschaftlichen Zukunft entgegen. Es lebt in demselben Wahn, der schon die Walfangindustrie in den Bankrott getrieben hat. Mit der zunehmenden Verbesserung der Walfang- und Verarbeitungsmethoden stiegen die jährlichen Fangquoten, und die Walfangindustrie gedieh prächtig. Die Walbestände gingen jedoch in demselben Maße zurück, bis sie praktisch erschöpft waren. Mehrere Arten, darunter der Blauwal, das größte Lebewesen in der Erdgeschichte, wurden nahezu ausgerottet. Erst daraufhin wurden dem Walfang gewisse Beschränkungen auferlegt. Übertragen Sie dieses Beispiel auf sinkende Grundwasserspiegel, versiegende Flüsse und verschwindendes Ackerland, und Sie werden verstehen, was ich meine.

Angenommen, das auf herkömmliche Weise errechnete weltweite Bruttosozialprodukt von derzeit ungefähr 31 Billionen US-Dollar stiege weiterhin jährlich um kräftige drei Prozent. Bis 2050 würde es theoretisch 138 Billionen Dollar betragen. Setzt man nur ein Mindestmaß an ausgleichender Umverteilung dieser Summe voraus, so wäre die gesamte Weltbevölkerung nach heutigem Maßstab wohlhabend. Eine wünschenswerte Entwicklung, so sollte man meinen. Was ist der Schwachpunkt dieser Rechnung? Dass die Umwelt zerstört wird. Wenn sich der Rückgang der natürlichen Ressourcen, insbesondere von Süßwasser und Ackerland, mit derselben Geschwindigkeit wie bisher fortsetzt, wird sich das Wirtschaftswachstum zwangsläufig verlangsamen. Die resultierenden Bemühungen um eine Ausdehnung der produktiven Flächen führen wiederum zur Ausrottung eines großen Teils der Flora und Fauna unserer Welt, was ich als sehr besorgniserregend empfinde, auch wenn Sie meine Sorge vielleicht nicht teilen.

Die für produktive Zwecke beanspruchte Landfläche – der ökologische Fußabdruck – ist bereits heute viel größer, als es eine nachhaltige Nutzung der Erde erlaubt, und der Trend ist noch immer steigend. Eine jüngere Studie zu diesem Thema kommt zu dem Ergebnis, dass die Weltbevölkerung wahrscheinlich bereits um das Jahr 1978 die Kapazitätsgrenze der Erde für ein nachhaltiges Wachstum erreicht hatte. Bis zum Jahr 2000 war diese Grenze bereits um das 1,4fache überschritten. Wenn zwölf Prozent der Landfläche zum Schutz der natürlichen Umwelt unangetastet bleiben sollen, wie es der Brundtland-Bericht 1987 empfahl, wäre die Grenze für ein nachhaltiges Wachstum bereits um 1972 überschritten worden. Kurz gesagt: Die Erde hat ihre Fähigkeit zur Regeneration verloren – bis der globale Konsum gesenkt und/oder die globale Produktion gesteigert wird.“

Die für produktive Zwecke beanspruchte Landfläche ist bereits heute viel größer, als es eine nachhaltige Nutzung der Erde erlaubt

Mit der Gegenüberstellung dieser zwei diametral entgegengesetzten Anschauungen zur wirtschaftlichen Zukunft möchte ich nicht andeuten, es gebe zwei Kulturen mit unterschiedlichen Wertvorstellungen. Alle, denen die Wirtschaft ebenso wie die Umwelt am Herzen liegt, und dies ist die große Mehrheit der Menschen, gehören derselben Kultur an. Der Blick unserer beiden Diskussionspartner ist nur auf verschiedene Punkte der menschlichen Raumzeitskala gerichtet. Sie unterscheiden sich in der Auswahl der Faktoren, die sie für ihre Zukunftsprognosen berücksichtigen, im Maß ihrer Wertschätzung der nichtmenschlichen Lebewesen sowie darin, wie weit sie in die Zukunft schauen. Die meisten Ökonomen und alle außer ihren politisch konservativsten öffentlichen Vertretern erkennen heute an, dass die Welt Grenzen hat und dass sich die Weltbevölkerung ein weiteres Wachstum kaum noch leisten kann. Aber obwohl sie wissen, dass der Mensch dabei ist, die ▶

biologische Vielfalt zu zerstören, wollen sie sich nicht damit auseinander setzen.

Glücklicherweise ist die ökologische Sichtweise auf dem Vormarsch. Vielleicht sollte man gar nicht mehr von „der ökologischen Sichtweise" sprechen – als ob es sich nicht um eine dem Allgemeinwohl verpflichtete Perspektive handelte –, sondern vielmehr von „der realistischen Sichtweise". In einer realistisch geführten und bewerteten Volkswirtschaft ist eine ausgewogene Bilanzierung selbstverständlich. Das herkömmliche Bruttosozialprodukt wird dabei durch einen umfassenderen Indikator für tatsächlichen Fortschritt (Genuine Progress Indicator, GPI) ersetzt, der auch die ökologischen Kosten wirtschaftlicher Aktivität abzuschätzen versucht. Eine wachsende Zahl von Ökonomen, Wissenschaftlern, Politikern und anderen haben sich bereits aktiv für diese veränderte Sichtweise eingesetzt.

Das menschliche Bevölkerungswachstum im 20. Jahrhundert entsprach eher der Vermehrung von Bakterien als von Primaten

Die Bevölkerungsexplosion …

Am oder um den 12. Oktober 1999 hat die Weltbevölkerung die Grenze von sechs Milliarden Menschen überschritten. Sie ist seitdem weiter gestiegen, und zwar mit einer Geschwindigkeit von 1,4 Prozent pro Jahr. Dies entspricht einem Zuwachs von 200 000 Menschen pro Tag und 1,4 Millionen pro Woche. Das kommt der Einwohnerzahl einer größeren Stadt gleich. Obwohl sich das Wachstum allmählich zu verlangsamen beginnt, steigt es noch immer im Wesentlichen exponentiell: je größer die Bevölkerung, desto schneller das Wachstum, und je schneller das Wachstum, desto größer die Bevölkerung. Diese Entwicklung setzt sich in astronomische Höhen fort, wenn nicht der Trend gestoppt und die Wachstumsrate auf null oder darunter gesenkt wird. Was ein solches exponentielles Wachstum bedeutet, wird deutlich, wenn man sich Folgendes vor Augen hält: Menschen, die im Jahr 1950 geboren wurden, sind die ersten, zu deren Lebzeiten sich die Weltbevölkerung verdoppelt hat – von 2,5 auf über 6 Milliarden. Allein im zwanzigsten Jahrhundert wuchs die Bevölkerung um mehr Menschen als bis dahin in der gesamten Menschheitsgeschichte. So lebten um 1800 circa eine Milliarde Menschen auf der Welt, und noch um 1900 waren es nicht mehr als 1,6 Milliarden.

Das Muster des menschlichen Bevölkerungswachstums im 20. Jahrhundert entspricht eher dem von Bakterien als dem von Primaten. So hat *Homo sapiens* mit Erreichen der 6-Milliarden-Grenze die Biomasse jeder anderen großen Landtierart, die je auf der Erde gelebt hat, um ein Hundertfaches überflügelt. Eine Fortsetzung der Entwicklung wie in den letzten hundert Jahren können sich die Menschheit und die Natur nicht mehr leisten.

Gegen Ende des 20. Jahrhunderts zeichnete sich in weiten Teilen der Welt eine gewisse Entspannung ab. In Nord- und Südamerika, in Europa, Australien und in einem Großteil Asiens traten die Menschen allmählich auf die Bremse. Die Fruchtbarkeitsrate, das heißt die durchschnittliche Anzahl der Kinder pro Frau, sank von 4,3 im Jahr 1960 auf 2,6 im Jahre 2000. Die für ein Nullwachstum erforderliche Fruchtbarkeitsrate, bei der sich Geburtenrate und Sterberate die Waage halten und die Bevölkerungszahl konstant bleibt, liegt bei 2,1 (das zusätzliche Zehntelprozent ist der Ausgleich für die Säuglings- und Kindersterblichkeit). Liegt die Fruchtbarkeitsrate auch nur geringfügig über 2,1, so nimmt die Bevölkerung dennoch exponentiell zu. Dies bedeutet: Auch wenn das Bevölkerungswachstum mit zunehmender Annäherung der Fruchtbarkeitsrate an den Wert 2,1 immer weniger steil ansteigt, wird die Menschheit irgendwann, zumindest theoretisch, mehr wiegen als die Erde und schließlich sogar die Masse des sichtbaren Universums übertreffen – vorausgesetzt, die Entwicklung dauert lange genug an. Wenn dagegen die Fruchtbarkeitsrate unter den Wert von 2,1 sinkt, nimmt die Bevölkerungszahl ab, und es ergibt sich eine negative exponentielle Wachstumskurve. Natürlich ist es eine grobe Vereinfachung, 2,1 als den kritischen Wert für ein Erreichen des Nullwachstums anzusetzen. Fortschritte in der medizinischen Versorgung können ihn durch Reduzierung oder Beseitigung der Säuglings- und Kindersterblichkeit auf den idealen Wert von 2,0 senken, während Hungersnöte, Epidemien und Kriege ihn durch eine Erhöhung der Sterblichkeit anheben. Über einen längeren Zeitraum und weltweit gemittelt, heben sich lokale Unterschiede und statistische Fluktuationen jedoch auf, und die ehernen demografischen Gesetze verschaffen sich unbarmherzig Geltung. Sie vermitteln uns stets die gleiche Botschaft: dass ein exzessives Bevölkerungswachstum die Erde überfordert.

Bis zum Jahr 2000 war die Fruchtbarkeitsrate in allen Ländern Westeuropas unter den Wert von 2,1 gesunken. An der Spitze stand dabei Italien mit durchschnittlich 1,2 Kindern pro Frau (so viel zum Einfluss kirchlicher Doktrin in Fragen der Geburtenkontrolle). Auch Thailand hat die magische Zahl unterschritten, ebenso der nicht zugewanderte Bevölkerungsanteil in den USA.

Wenn ein Land seine jeweilige Geburtenrate für ein Nullwachstum erreicht oder gar unterschritten hat, kommt sein Bevölkerungswachstum nicht sofort zum Stillstand. Durch das positive Wachstum kurz vor Erreichen des kritischen Wertes gibt es eine unverhältnismäßig hohe Anzahl junger Menschen, die den größten Teil ihres Lebens und damit ihre fruchtbaren Jahre noch vor sich haben. Erst wenn diese Gruppe älter wird und der Anteil von Menschen, die Kinder bekommen, abnimmt, stabilisiert sich die Altersverteilung auf dem Niveau des Nullwachstums, und die Bevölkerung wächst nicht weiter. Selbst wenn ein Land den kritischen Wert unterschreitet, vergeht eine gewisse Zeit, bevor die absolute Wachstumsrate negativ wird und die Bevölkerung tatsächlich zurückgeht. Italien und Deutschland beispielsweise haben eine solche Phase des absoluten negativen Bevölkerungswachstums erreicht.

Der Rückgang des globalen Bevölkerungswachstums ist auf drei miteinander verknüpfte soziale Einflussfaktoren zurückzuführen: die Globalisierung einer von Wissenschaft und Technik



angetriebenen Wirtschaft, die damit einhergehende Landflucht der Bevölkerung und, daraus resultierend, die zunehmende Gleichstellung der Frau. Die soziale und wirtschaftliche Befreiung der Frau schlägt sich in einem Rückgang der Geburten nieder. Die bewusste Entscheidung der Frauen für weniger Kinder kann als ein Geschenk, ja geradezu als ein Segen für künftige Generationen betrachtet werden. Denn es könnte auch genau umgekehrt sein, dass sich nämlich Frauen – durch zunehmenden Wohlstand von wirtschaftlichen Zwängen befreit – für mehr Nachkommen entscheiden. Das Gegenteil ist der Fall. Statt größere Familien zu haben, ziehen sie es vor, eine kleinere Zahl von Kindern aufzuziehen, die gesünder und mit besseren Ausbildungschancen aufwachsen. Dadurch verbessern sich gleichzeitig ihre eigenen Lebensbedingungen. Dieser Trend scheint weit verbreitet, wenn nicht gar allgemeingültig zu sein. Seine Bedeutung kann gar nicht überschätzt werden. Gesellschaftskritiker behaupten oft, die Menschheit gefährde sich durch ihre natürlichen Instinkte – etwa Stammesdenken, Aggression und Habgier – selbst in ihrer Existenz. Meines Erachtens werden künftige Demografen darauf verweisen, dass die Rettung der Menschheit eben einem dieser Instinkte zu verdanken ist, dem Mutterinstinkt.

… und ihr Umkehrpunkt

Wenn der weltweite Trend zu kleineren Familien weiter anhält, wird das Bevölkerungswachstum irgendwann zum Stillstand kommen und schließlich sogar rückläufig sein. Die Weltbevölkerung wird einen Höhepunkt erreichen und danach wieder abfallen. Doch um wie viel wird sie noch wachsen, und wann wird sie ihren Höhepunkt erreichen? Wie wirkt sich das Bevölkerungswachstum bis dahin auf die Umwelt aus?

Im September 1999 veröffentlichte das Referat für Bevölkerung der Hauptabteilung für Wirtschaftliche und Soziale Angelegenheiten der Vereinten Nationen auf der Grundlage vier verschiedener Annahmen für die weibliche Fruchtbarkeitsrate eine Reihe möglicher Zukunftsszenarien bis zum Jahr 2050. Wenn die Anzahl der Kinder pro Frau sofort auf zwei sänke, so würde sich die Weltbevölkerung um das Jahr 2050 auf ungefähr 7,3 Milliarden Menschen einpendeln. Ein so starker Wachstumsrückgang ist natürlich nicht eingetreten und wird sicherlich auch in den nächsten Jahrzehnten nicht erreicht werden. Der Wert von 7,3 Milliarden Menschen ist somit also extrem unwahrscheinlich. Wenn andererseits die Fruchtbarkeitsrate weiterhin in dem Maße abnimmt wie bisher, wird die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 auf ungefähr 10,7 Milliarden Menschen anwachsen und noch einige Jahrzehnte einen steilen Anstieg verzeichnen, bis der Höhepunkt erreicht ist. Hält dagegen der gegenwärtige Wachstumstrend an, so werden bis zum Jahr 2050 14,4 Milliarden Menschen die Erde bevölkern. Wenn schließlich die globale Fruchtbarkeitsrate schneller auf einen Wert von 2,1 oder darunter sinkt, als der gegenwärtige Trend erwarten lässt, so wird die Weltbevölkerung bis 2050 8,9 Milliarden Menschen betragen. Auch in diesem Fall würde sie zwar noch eine Weile weiter wachsen, doch die Kurve wäre weniger steil. Das zuletzt beschriebene Szenarium dürfte das wahrscheinlichste sein. Man kann also mit einiger Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass die Weltbevölkerung im ausgehenden 21. Jahrhundert bei neun bis zehn Milliarden Menschen ihren Höhepunkt erreichen wird.

Wenn erschwingliche Methoden der Empfängnisverhütung zur Verfügung stehen und Frauen die Wahlmöglichkeit haben, machen sie von diesem Angebot in der Regel Gebrauch. Der Prozentsatz von Frauen, die Geburtenkontrolle praktizieren, variiert dabei noch stark von Land zu Land. In Europa und den Vereinigten Staaten liegt ihr Anteil bei mehr als 70 Prozent, dicht gefolgt von Thailand und Kolumbien. In Indonesien sind es ungefähr 50 Prozent; in Bangladesch und Kenia 30 Prozent, während es in Pakistan nach wie vor nicht mehr als 10 Prozent sind. Viele nationale Regierungen wollen die Geburtenkontrolle weiter ausbauen oder dulden sie zumindest stillschweigend. Dies lässt hoffen, dass sich die Familienplanung global weiter durchsetzen wird. Bis 1996 gab es bereits in 130 Ländern staatlich geförderte Programme zur Familienplanung. Darüber hinaus verfolgten mehr als die Hälfte aller Entwicklungsländer neben ihrer Wirtschafts- und Verteidigungspolitik eine gezielte Bevölkerungspolitik. Über 90 Prozent der übrigen Entwicklungsländer erklärten ihre Absicht, diesem Beispiel folgen zu wollen. Eine verblüffende Ausnahme bilden die Vereinigten Staaten, für die das Thema praktisch noch immer ein Tabu darstellt.

Die Förderung bevölkerungspolitischer Maßnahmen seitens der Entwicklungsländer hätte nicht einen Augenblick später einsetzen dürfen, denn das ökologische Schicksal der Welt liegt letztlich in ihren Händen. Praktisch das gesamte Bevölkerungswachstum der Welt findet heute in den Entwicklungsländern statt, und diese werden unerbittlich nach einem höheren Pro-Kopf-Verbrauch streben.

Die Folgen des Bevölkerungswachstums sind weit gefächert und tief greifend. Die Menschen in den Entwicklungsländern sind im Durchschnitt weitaus jünger als in den Industrieländern, und diese Kluft wird sich noch vergrößern. In mindestens 68 Ländern machen Kinder und Jugendliche unter fünfzehn Jahren mehr als 40 Prozent der Bevölkerung aus. Hier einige typische Zahlen aus dem Jahr 1999: Afghanistan 42,9 Prozent, Benin 47,9 Prozent, Kambodscha 45,4 Prozent, Äthiopien 46,0 Prozent, Grenada 43,1 Prozent, Haiti 42,6 Prozent, Irak 44,1 Pro- ▶

Man kann mit einiger Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass die Weltbevölkerung im ausgehenden 21. Jahrhundert neun bis zehn Milliarden Menschen erreichen wird

zent, Libyen 48,3 Prozent, Nicaragua 44,0 Prozent, Pakistan 41,8 Prozent, Sudan 45,4 Prozent, Syrien 46,1 Prozent und Simbabwe 43,8 Prozent.

Ein armes Land mit einem hohen Bevölkerungsanteil von Kindern und Jugendlichen steht vor fast unlösbaren Problemen, wenn es seiner Bevölkerung auch nur ein Mindestmaß an Gesundheitsversorgung und Ausbildung bieten will. Zwar kann das Überangebot an ungelernten, billigen Arbeitskräften einen gewissen marktwirtschaftlichen Vorteil bedeuten; aber gerade diese Menschen werden auch als Kanonenfutter in ethnischen Konflikten und Kriegen eingesetzt. Mit steigender Weltbevölkerung und zunehmender Verknappung von Wasser und Ackerland sind die Industrieländer wachsendem Druck seitens der Entwicklungsländer ausgesetzt: durch den Zustrom verzweifelter Einwanderungswilliger und die Gefahr sich ausbreitenden internationalen Terrorismus.

Schon heute verbraucht der Mensch rund vierzig Prozent der von Grünpflanzen produzierten organischen Materie auf diesem Planeten

Grenzen der Belastbarkeit

Wie viele Menschen kann die Erde versorgen, bis die Grenzen ihrer Belastbarkeit erreicht sind? Diese Frage lässt sich grob beantworten, doch hängt die Antwort von drei Rahmenbedingungen ab: Über welchen Zeitraum soll die Erde in der Lage sein, die Menschheit zu versorgen? Wie gleichmäßig sollen die Ressourcen verteilt werden? Welchen Lebensstandard strebt man für die Mehrheit der Menschen an?

Betrachten wir die Ernährung, die Ökonomen gewöhnlich stellvertretend als Maßstab für die Tragfähigkeit der Erde benutzen. Die Weltgetreideproduktion, die den Hauptkalorienanteil der menschlichen Ernährung bereitstellt, beträgt heute ungefähr zwei Milliarden Tonnen jährlich. Dieser Ertrag reicht theoretisch aus, um den Bedarf von rund zehn Milliarden Indern zu decken, die sich hauptsächlich von Getreide ernähren und nach westlichem Maßstab nur sehr wenig Fleisch konsumieren. Derselbe Ertrag würde jedoch nur für ungefähr 2,5 Milliarden Amerikaner ausreichen, da diese einen großen Teil ihres Getreides für die Vieh- und Geflügelzucht benötigen. Problematisch wird es, sobald auch Indien und andere Entwicklungsländer mehr Fleisch in ihre Ernährung einbeziehen. Wenn sich die Bodenerosion und der Rückgang des Grundwassers im gleichen Maße wie bisher fortsetzen, erscheint es unvermeidlich, dass bei einem Anstieg der Weltbevölkerung auf neun bis zehn Milliarden Menschen Nahrungsmittelengpässe eintreten. Es gibt zwei Möglichkeiten, um diesem Notstand vorzubeugen: Entweder steigen die Industrieländer auf eine stärker vegetarisch ausgerichtete Ernährung um, oder die landwirtschaftlichen Erträge werden weltweit um mehr als 50 Prozent gesteigert.

Die Grenzen der Biosphäre stehen unumstößlich fest. Jeder, der nicht gerade in blindem Fortschrittsglauben befangen ist, muss erkennen, dass die Belastbarkeit der Erde allmählich ausgeschöpft ist. Schon heute nimmt der Mensch rund 40 Prozent der von Grünpflanzen produzierten organischen Materie auf diesem Planeten in Besitz. Wenn alle Menschen übereinkämen, sich vegetarisch zu ernähren und so gut wie kein Getreide mehr für die Viehzucht zu verwenden, dann würde die derzeit für landwirtschaftliche Zwecke genutzte Fläche von 1,4 Milliarden Hektar rund zehn Milliarden Menschen ernähren. Wenn die Menschheit sogar die gesamte durch Pflanzenphotosynthese gewonnene Energie auf dem Lande und im Meer – insgesamt ungefähr 40 Billionen Watt – für die Ernährung verwenden würde, könnte der Planet etwa 17 Milliarden Menschen versorgen. Doch schon lange bevor diese letzten Reserven erschöpft wären, dürfte das Leben auf der Erde zur Hölle geworden sein.

Natürlich mag es hier und da noch Möglichkeiten geben, die Nahrungsmittelproduktion zu steigern. So könnte man versuchen, die letzten Erdölreserven in Nahrung zu verwandeln. Möglicherweise gelingt es auch, mit Hilfe der Kernfusion Energie für die Erzeugung von Licht zu gewinnen, das zur Photosynthese und zur Erzeugung eines von Sonnenlicht unabhängigen Pflanzenwachstums benutzt werden kann. Vielleicht lernt es die Menschheit auch eines fernen Tages, die gesamte Sonnenenergie für die Erhaltung des menschlichen Lebens auf der Erde nutzbar zu machen und Kolonien auf anderen Planeten des Sonnensystems zu gründen. Aber gewiss wird niemand von uns bis an diese Grenzen vorstoßen wollen, nur damit die Menschheit ihre reproduktive Torheit weiter fortsetzen kann.

Das Epizentrum der ökologischen Veränderungen, das Sinnbild für Bevölkerungsdruck, ist die Volksrepublik China. Im Jahr 2000 zählte die chinesische Bevölkerung 1,2 Milliarden Menschen, ein Fünftel der Weltbevölkerung. Demografen vermuten, dass bis zum Jahr 2030 rund 1,6 Milliarden Menschen in China leben werden. Zwischen 1950 und 2000 wuchs die Bevölkerung Chinas um 700 Millionen Menschen. Das sind mehr Menschen, als zu Beginn der Industriellen Revolution auf der ganzen Welt lebten. Der größte Teil dieses Bevölkerungszuwachses drängt sich in den Einzugsgebieten des Jangtse und des Gelben Flusses, die ungefähr eine Fläche von der Größe der amerikanischen Oststaaten einnehmen.

Als sich die Amerikaner in der Vergangenheit in einer ähnlichen Situation befanden, hatten sie allerdings das große Glück, sich geografisch ausdehnen zu können. Zur Zeit der Gründung der Republik 1776 zählte die amerikanische Bevölkerung zwei Millionen Menschen. Bis zum Jahr 2000 wuchs sie explosionsartig auf 270 Millionen an. Während dieser Phase konnten sich die Amerikaner jedoch ungehindert über einen fruchtbaren und im Wesentlichen leeren Kontinent ausbreiten. Wie eine Flutwelle ergoss sich der Menschenstrom westwärts in das Ohio-Tal, die Große Ebene und schließlich bis in die Täler der Pazifikküste. Die Chinesen konnten dagegen nirgendwohin ausweichen. Im Westen bildeten Wüsten und Berge eine unüberwindliche Grenze, und im Süden stießen sie auf den Widerstand anderer Völker. So blieb der Bevölkerung nichts anderes übrig, als auf dem Land, das schon ihre Vorfahren seit Jahrtausenden bewirtschafteten, immer dichter zusam-



menzurücken. China entwickelte sich somit zu einer riesigen übervölkerten Insel – vergleichbar mit Jamaika oder Haiti, nur eben viel größer.

Als hoch intelligentes, innovatives Volk haben die Chinesen das Beste aus ihrer Situation gemacht. Heute sind China und die USA die zwei führenden Getreideproduzenten der Welt. Gemeinsam bauen sie einen überdurchschnittlich hohen Anteil des Grundnahrungsmittels an, das den Kalorienbedarf der Weltbevölkerung zu einem großen Teil deckt. Chinas riesige Bevölkerung steht jedoch kurz davor, mehr zu konsumieren, als sie produzieren kann. 1997 prognostizierte ein Wissenschaftlerteam in einem Bericht für den US-amerikanischen National Intelligence Council (NIC), dass China bis zum Jahre 2025 jährlich 175 Millionen Tonnen Getreide einführen müsse.

Extrapoliert man diese Schätzung bis zum Jahr 2030, so steigt der jährliche Bedarf auf 200 Millionen Tonnen an, was der gesamten derzeitigen weltweiten Exportmenge entspricht. Ändern sich die Parameter dieses Modells, können diese Zahlen nach oben oder unten abweichen, doch wäre es leichtfertig, sich beim Entwurf einer langfristigen Planungsstrategie von einer optimistischen Haltung leiten zu lassen, wenn so viel auf dem Spiel steht. In der Tat führten die Chinesen nach 1997 auf Provinzebene ein Sofortprogramm zur Steigerung der Getreideproduktion auf Exportniveau ein. Die Bemühungen waren erfolgreich, doch möglicherweise nur auf kurze Sicht, wie auch die Regierung selbst anerkennt. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen nämlich unrentable Böden kultiviert werden, der ökologische Schaden pro Hektar bewirtschafteter Fläche steigt, und die kostbaren Grundwasserreserven des Landes werden noch schneller erschöpft, als dies ohnehin schon der Fall ist.

Chinas Dilemma

Dem Bericht des National Intelligence Council zufolge könnte ein Rückgang der chinesischen Getreideproduktion möglicherweise von den fünf großen Getreide-Exporteuren – USA, Kanada, Argentinien, Australien und der Europäischen Union – aufgefangen werden. Die Exporte dieser führenden Getreideproduzenten haben jedoch nach einem anfänglich steilen Anstieg in den sechziger und siebziger Jahren nicht mehr nennenswert zugenommen und bewegen sich seit den achtziger Jahren auf ungefähr konstantem Niveau. Mit den derzeitigen landwirtschaftlichen Kapazitäten und Methoden kann dieser Ertrag wahrscheinlich nicht mehr signifikant gesteigert werden. So haben die USA und die Europäische Union sogar schon begonnen, die im Rahmen früherer Flächenstilllegungsprogramme vernachlässigten Produktionsflächen wieder zu bewirtschaften. In Australien und Kanada, die im Wesentlichen von Trockenfarmsystemen abhängen, ist der limitierende Faktor für Produktionssteigerungen der geringe Niederschlag. Und in Argentinien gibt es zwar noch Spielraum für eine Produktionssteigerung, aber das Land ist nicht besonders groß, und so ist nicht anzunehmen, dass Argentiniens Getreideüberschüsse zehn Millionen Tonnen pro Jahr überschreiten werden.

China selbst hängt in starkem Maße von künstlicher Bewässerung ab, wobei das Wasser zum Teil aus Flüssen und zum Teil aus Grundwasser führenden Gesteinsschichten (Aquifers) entnommen wird. Das größte Problem sind hier abermals die geografischen Rahmenbedingungen: Zwei Drittel der landwirtschaftlichen Produktion werden im Norden erzeugt, während die Wasservorräte zu 80 Prozent im Süden, hauptsächlich im Gebiet des Jangtse, lokalisiert sind. Künstliche Bewässerung und die Wasserentnahme für industrielle und private Nutzung haben die Wasservorräte der nördlichen Becken, in denen der Gelbe Fluss, der Haihe-, der Huaihe- und Liaohe-Fluss entspringen, praktisch erschöpft. In diesen Regionen und im Jangtse-Becken leben insgesamt 900 Millionen Menschen; 75 Prozent der Nahrungsmittel Chinas werden dort produziert.

Seit 1972 trocknet der Gelbe Fluss fast jährlich auf einem Teil seines Laufs durch die Provinz Shandong bis zum Meer aus. 1997 versiegte er über einen Zeitraum von 130 Tagen ganz, dann floss er wieder für kurze Zeit, bis er erneut für den Rest des Jahres austrocknete. Insgesamt führte er in jenem Jahr über einen Zeitraum von 226 Tagen kein Wasser, was einen neuen traurigen Rekord darstellte. Da die Provinz Shandong normalerweise ein Fünftel der chinesischen Weizenernte und ein Siebtel der Maisernte einfährt, hat das Versiegen des Gelben Flusses nicht unerhebliche Auswirkungen. Allein der Ernteausfall im Jahr 1997 belief sich auf 1,7 Milliarden Dollar.

Der Grundwasserspiegel der nördlichen Ebenen ist inzwischen bedenklich gefallen. Mitte der neunziger Jahre sank er durchschnittlich um 1,5 Meter pro Jahr. In Peking selbst fiel er zwischen 1965 und 1995 um 37 Meter.

Im Hinblick auf den chronischen Wassermangel im Einzugsgebiet des Gelben Flusses hat die chinesische Regierung den Bau des Xiaolangdi-Staudamms beschlossen, der an Größe nur noch von dem Drei-Schluchten-Staudamm am Jangtse übertroffen wird. Der Xiaolangdi-Staudamm soll die Probleme saisonaler Überschwemmung wie auch periodischer Dürre lösen. Darüber hinaus werden Pläne für den Bau von Kanälen erarbeitet, um Wasser aus dem nie versiegenden Jangtse in den Gelben Fluss und nach Peking umzuleiten.

Ob diese Maßnahmen das landwirtschaftliche und wirtschaftliche Wachstum Chinas nachhaltig zu stützen vermögen, lässt sich zurzeit nicht abschätzen. Fest steht jedoch, dass solche Maßnahmen mit Nebenwirkungen einhergehen, die große Komplikationen hervorrufen können. An erster Stelle ist hier die Gefahr der Versandung durch ▶

Das menschliche Gehirn ist offenbar evolutionsbedingt darauf ausgelegt, sich nur für ein begrenztes geografisches Gebiet verantwortlich zu fühlen

mitgeschwemmten Lössböden zu nennen. Der Gelbe Fluss ist das schlammhaltigste fließende Gewässer der Welt, und einer Studie zufolge könnte er den Xiaolangdi-Stausee schon dreißig Jahre nach Fertigstellung komplett versanden.

Die Volksrepublik China hat sich selbst in eine Situation hineinmanövriert, in der sie gezwungen ist, die Wasserversorgung ihrer Flachlandgebiete ständig neu zu konzipieren und umzugestalten. Das ist jedoch nicht das Hauptproblem. Der wesentliche Punkt ist, dass China eine zu große Bevölkerung hat. Diese Bevölkerung ist außerdem bewundernswert fleißig und drängt energisch nach sozialem Aufstieg und Erfolg. Der ohnehin hohe Wasserbedarf wird dadurch weiter in die Höhe schnellen. Hochrechnungen zufolge wird sich allein die private Nachfrage bis zum Jahr 2030 auf 134 Milliarden Tonnen vervierfachen, während sich die industrielle Nachfrage auf 269 Milliarden Tonnen verfünffachen wird. Dies wird drastische Auswirkungen haben. Schon heute sind 300 von 617 chinesischen Städten von Wassermangel bedroht.

Von Natur aus neigen wir dazu, keine Gedanken an Gefahren zu verschwenden, die noch in weiter Ferne liegen – ein Stück unseres steinzeitlichen Erbes

Menetekel für die Menschheit

Der Druck auf die Landwirtschaft wird in China zusätzlich durch ein Dilemma verschärft, das in unterschiedlich starker Ausprägung alle Länder betrifft. Mit zunehmender Industrialisierung steigt das Pro-Kopf-Einkommen, und die Menschen konsumieren mehr Nahrung. Sie bewegen sich außerdem durch stärkeren Konsum von Fleisch- und Milchprodukten in der Energiepyramide nach oben. Da die Kalorienzahl, die aus einem Kilogramm Getreide gewonnen wird, abnimmt, wenn es über den Umweg von Geflügel oder Fleisch Eingang in die menschliche Ernährung findet, steigt der Getreidekonsum pro Kopf zwangsläufig an. Die zur Verfügung stehenden Wasserreserven bleiben dagegen mehr oder weniger konstant. Auf einem freien Markt kann die landwirtschaftliche Nutzung von Wasser nicht mit der industriellen Nutzung konkurrieren. Tausend Tonnen Süßwasser ergeben eine Tonne Weizen mit einem Wert von 200 Dollar. Dieselbe Wassermenge wirft in der Industrie einen Ertrag von 14 000 Dollar ab. Mit zunehmendem Wohlstand durch Industrie und Handel wird das ohnehin knappe Wasser in China also immer teurer werden. Die Kosten der landwirtschaftlichen Produktion werden entsprechend steigen und damit auch die Nahrungsmittelpreise, wenn nicht der Staat die Bereitstellung von Wasser subventioniert. Das ist zum Teil der Beweggrund für die mit enormen öffentlichen Mitteln gebauten Staudämme der Drei Schluchten und von Xiaolangdi.

Theoretisch muss eine wohlhabende industrialisierte Volkswirtschaft nicht unbedingt landwirtschaftlich unabhängig sein. China könnte also seinen zusätzlichen Getreidebedarf durch Zukäufe von den fünf großen Getreideproduzenten decken – theoretisch. Unglücklicherweise ist die chinesische Bevölkerung jedoch so groß und der Weltgetreideüberschuss so gering, dass eine solche Lösung nicht ohne Auswirkung auf den Weltmarkt bliebe. Durch seine Nachfrage wird China unweigerlich den Preis für Getreide in die Höhe treiben, was es wiederum den ärmeren Entwicklungsländern erschwert, ihren eigenen Bedarf zu decken. Gegenwärtig sinkt der Getreidepreis zwar noch, doch ist anzunehmen, dass sich dies mit wachsender Bevölkerungszahl ändern wird.

Ressourcenexperten stimmen darin überein, dass dieses Problem nicht ausschließlich mit den Methoden des Wasserbaus gelöst werden kann. Erforderlich ist unter anderem der Übergang zu einem verstärkten Anbau von Obst und Gemüse, der zwar arbeitsintensiver ist als die Getreideerzeugung, dadurch aber China einen Wettbewerbsvorteil verschafft. Strenge Wassersparmaßnahmen in Industrie und Haushalten sind ebenso vonnöten wie der landwirtschaftliche Einsatz von Tropfbewässerungssystemen und optimierten Beregnungsanlagen statt der herkömmlichen, verschwenderischen Überflutungs- und Furchenbewässerung. Auch die Privatisierung von Landbesitz kann in Verbindung mit Subventionen und Preisliberalisierung verstärkt Anreize für Bauern bieten, Wasser zu sparen.

Die Kosten, die China der Umwelt zur Erhaltung seines Wachstums aufbürdet – und die in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung selten auftauchen –, erreichen unterdessen ein verheerendes Ausmaß. Zu den aufschlussreichsten Indikatoren zählt die Verschmutzung des Wassers. Die größeren Flüsse Chinas erstrecken sich über eine Gesamtlänge von rund 50 000 Kilometern. Nach Berichten der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) sind achtzig Prozent dieser Wasserläufe so verseucht, dass in ihnen keine Fische mehr leben. Der Gelbe Fluss zum Beispiel ist über weite Strecken tot. Sein Wasser – vergiftet durch Chrom, Cadmium und andere Giftstoffe, die aus Ölraffinerien, Papierfabriken und Chemieanlagen stammen – ist ungenießbar und taugt noch nicht einmal zur Bewässerung. Krankheiten infolge bakterieller Verseuchung oder toxischer Belastung sind weit verbreitet.

China kann sich vermutlich noch bis mindestens Mitte dieses Jahrhunderts selbst ernähren, doch geht aus seinen eigenen statistischen Daten hervor, dass es sich dabei am Rande des Abgrunds bewegt – ungeachtet seiner lebensrettenden Bemühungen um zunehmende Industrialisierung und verstärkten Bau von Megastaudämmen. Die extrem kritische Situation, in der sich China befindet, macht es verwundbar gegenüber den Wechselfällen der Geschichte. Kriege, innere Unruhen, ausgedehnte Dürreperioden oder Missernten können die Wirtschaft ins Schleudern bringen. Eine Rettung von außen dürfte angesichts seiner gewaltigen Bevölkerung aussichtslos sein.

China verdient höchste Aufmerksamkeit, nicht nur weil ein Fehltritt dieses schwankenden Riesen die Welt erschüttern könnte, sondern auch weil es auf dem Weg, den die gesamte Menschheit allem Anschein nach unweigerlich einschlagen wird, bereits ein weites Stück zurückgelegt hat. Wenn China seine Probleme in den Griff bekommt, können

die dabei gemachten Erfahrungen auf andere Länder übertragen werden. Zum Beispiel auf die Vereinigten Staaten, wo das Bevölkerungswachstum rapide zunimmt und die natürlichen Umweltressourcen bedenkenlos dezimiert werden.

Die Umweltschutzbewegung wird noch immer weithin als Interessengruppe einiger weniger betrachtet. Ihre Mitglieder, so das Klischeebild, ereifern sich über Umweltverschmutzung und bedrohte Arten und übertreiben dabei maßlos. Uneinsichtig drängen sie auf Naturschutz und restriktive Vorschriften für die Industrie, selbst um den Preis eines geringeren Wirtschaftswachstums oder des Verlustes von Arbeitsplätzen.

Gefährdetes Vermächtnis

Die Ökologie, auf der der Umweltschutzgedanke basiert, ist aber etwas weitaus Grundlegenderes und Wichtigeres. Anders als die anderen Sonnenplaneten befindet sich die Erde nicht in einem physikalischen Gleichgewicht. Sie ist auf ihre lebendige Hülle angewiesen, um die besonderen Bedingungen erzeugen zu können, unter denen Leben gedeiht. Der Boden, das Wasser und die Atmosphäre der Erdoberfläche haben sich über viele Jahrmillionen entwickelt. Sie sind geprägt von den Prozessen in der Biosphäre, einer erstaunlich komplexen Schicht lebendiger Organismen, die in genau aufeinander abgestimmten, empfindlichen Stoff- und Energiekreisläufen miteinander in Wechselwirkung stehen. Jeden Tag und jede Minute erschafft die Biosphäre unsere besondere Welt aufs Neue und erhält sie in einem einzigartigen Zustand des Ungleichgewichts. Von der Bewahrung dieses physikalischen Zustands hängt die Menschheit in essenzieller Weise ab. Wenn wir die Biosphäre verändern, greifen wir in das empfindliche biologische Kräftespiel der natürlichen Umwelt ein. Wenn wir Ökosysteme vernichten und Arten ausrotten, zerstören wir für alle Zukunft das größte Vermächtnis, das uns dieser Planet zu bieten hat. Und wir gefährden dadurch unsere eigene Existenz.

Wir Menschen sind weder Engel, die auf die Erde herabgestiegen sind, noch sind wir Außerirdische, die die Erde besiedelten. Wir haben uns hier als eine von vielen Arten über Jahrmillionen entwickelt. Die natürliche Umwelt, die wir mit so unnötiger Ignoranz und Rücksichtslosigkeit behandeln, war unsere Wiege und unsere Schule. Sie ist und bleibt unsere einzige Heimat. An ihre besonderen Lebensbedingungen haben wir uns mit jeder Faser und bis in die letzten biochemischen Vorgänge unseres Körpers angepasst.

Dies ist der Kerngedanke der Ökologie. Aber noch hat er sich nicht allgemein durchgesetzt. Noch vermag er es allem Anschein nach nicht, die Mehrheit der Menschen von ihren Hauptzerstreuungen wie Sport, Politik, Religion und Streben nach persönlichem Wohlstand abzulenken.

Die relative Gleichgültigkeit gegenüber der Umwelt ist meines Erachtens tief in der menschlichen Natur verankert. Das menschliche Gehirn ist offenbar evolutionsbedingt darauf ausgelegt, sich nur für ein begrenztes geografisches Gebiet, für eine beschränkte Zahl von Angehörigen und für höchstens zwei bis drei Generationen in die Zukunft verantwortlich zu fühlen. Mangelnder Weitblick, was die zeitliche wie auch die räumliche Dimension betrifft, ist im Darwin'schen Sinne lebenswichtig. Von Natur aus neigen wir dazu, keine Gedanken an Möglichkeiten oder Gefahren zu verschwenden, die noch in weiter Ferne liegen – eine Haltung, die man gemeinhin als gesunden Menschenverstand bezeichnet. Warum verhalten sich die Menschen so kurzsichtig? Der Grund ist einfach: Es ist ein Stück unseres steinzeitlichen Erbes, das sich im Laufe der Evolution tief eingeprägt hat. Über Jahrtausende hinweg zahlte es sich aus, innerhalb eines kleinen Kreises von Verwandten und Freunden kurzfristige Ziele zu verfolgen. Die Menschen lebten länger und hinterließen mehr Nachkommen, selbst wenn ihre kollektiven Bestrebungen den Niedergang ihrer Stämme und Reiche zur Folge hatten. Die langfristige Perspektive, die vielleicht auch ihren entfernten Nachfahren das Überleben ermöglicht hätte, erforderte eine Vision und einen über die nächsten Angehörigen hinausgehenden Altruismus, die instinktiv schwer aufzubringen sind.

Der Grund, warum sich die ökologische Denkart so schwer durchsetzt, beruht auf genau diesem Konflikt zwischen kurz- und langfristigen Werten. Werte für die nahe Zukunft des eigenen Stammes oder des eigenen Landes auszuwählen, ist relativ einfach. Werte für die ferne Zukunft des gesamten Planeten zu definieren, ist ebenfalls relativ einfach – zumindest in der Theorie. Beide Visionen miteinander in Einklang zu bringen, um eine allgemein gültige Umweltethik zu entwickeln, ist dagegen äußerst schwierig. Dennoch bleibt uns nichts anderes übrig, denn nur eine universelle Umweltethik kann uns den Engpass überwinden helfen, den wir so töricht selbst herbeigeführt haben. ■



***Edward O. Wilson** promovierte an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), wo er heute Pelegrino University Professor und Ehrenkurator in Entomologie am Museum für Vergleichende Zoologie ist. Zu seinen vielen Auszeichnungen gehören die National Medal of Science, zwei Pulitzer-Preise (für* On Human Nature, *1978, und zusammen mit Bert Hölldobler von der Universität Würzburg für* The Ants, *1990) sowie der Tyler-Preis für Verdienste um die Umwelt. Er ist der Autor vieler weiterer bahnbrechender Bücher, darunter* Consilience *und* Sociobiology.

Der Artikel ist die leicht gekürzte Wiedergabe von Kapitel 2 aus dem Buch Die Zukunft des Lebens *von Edward O. Wilson, das Ende Februar 2002 im Siedler-Verlag in München erscheint.*

Die Computermaus

Ohne dieses kleine Eingabegerät hätten Arbeitsplatz- und Home-Computer wohl kaum einen solchen Siegeszug angetreten. Ohne Maus gäbe es keine grafischen Benutzeroberflächen mit ihren Pull-down-Menüs und Icons, ebenso wenig das beliebte World Wide Web mit seinen anklickbaren Internet-Links. Umgekehrt verdankt die Computermaus ihren kommerziellen Erfolg der ersten Generation von Personal Computern in den frühen 1980er Jahren, wie dem Apple-Computer, dem IBM-PC und dem Xerox PARC Star. Erfunden hatte Douglas Engelbart das Prinzip schon 1968.

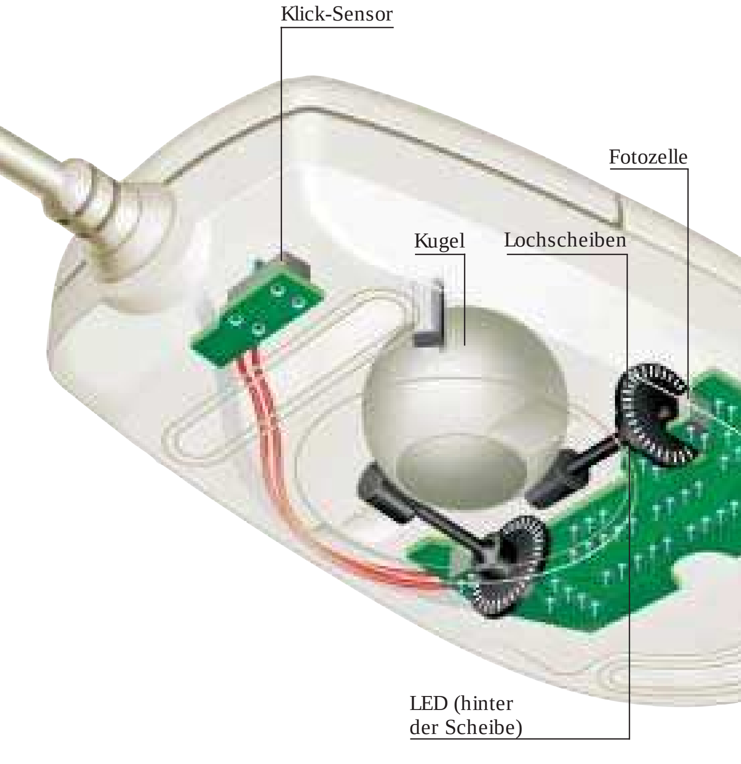
Damals war sie noch ein kleiner Kasten, heute liegt die Maus dank ihrer abgerundeten, ergonomischen Form gut in der Hand. Allerlei Tasten und Rädchen erweitern die Bedienmöglichkeiten. Doch an einem hat sich beim Gros der Geräte nichts geändert: Die Bewegungen werden meist von einer kleinen Gummikugel in der Gehäuseunterseite in elektrische Signale umgesetzt. Weil sich diese Kugel aber abreibt oder ihre Oberfläche sich mit Staub zusetzt, muss das elektromechanische System regelmäßig gereinigt oder gewartet werden.

Deshalb kamen vor ein paar Jahren auch optische Mäuse auf den Markt. Diese beleuchten die unter ihr liegende Fläche, eine winzige Kamera macht davon rund 1500 Aufnahmen pro Sekunde und ein Signalprozessor ermittelt daraus die momentane Bewegungsrichtung. Ohne Kugel und andere bewegliche Teile, die verschmutzen oder sich verhaken könnten, arbeitet das Gerät präziser. Auf dem Bildschirm macht sich das sofort bemerkbar: Der Cursor als Abbild der Mausbewegung ruckelt kaum. Außerdem arbeitet eine optische Maus auf fast jeder Oberfläche, nicht nur auf speziellen Unterlagen.

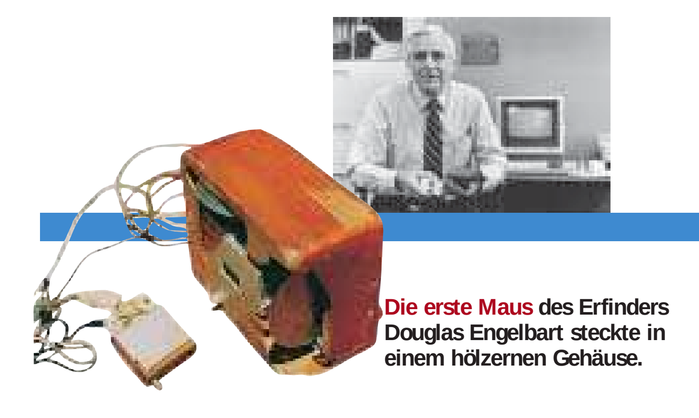
Um auch mobile Computer mit einem solchen Eingabegerät auszustatten, wurde die Maus sozusagen auf den Rücken gelegt: Der deutlich größere „Trackball“ ist eine Kugel, die, fest im Gehäuse installiert, mit Zeigefinger oder Daumen bewegt wird. Auch hier gibt es die optische Variante: Ein Lichtstrahl verfolgt diese Drehung.

Computermäuse wurden im Laufe der Jahre immer billiger. Kostete eine Maus von Microsoft 1983 noch umgerechnet etwa 100 Euro, ist sie heute für weit weniger als die Hälfte zu haben. Und wen die Kabelverbindung stört, der kann auf eine Funkmaus zurückgreifen.

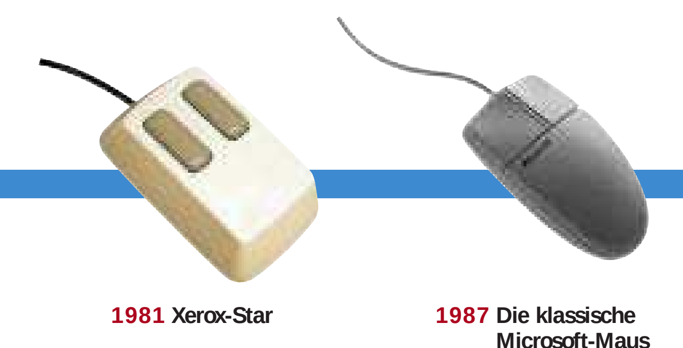
Der Autor ***Mark Fischetti*** *ist freier Mitarbeiter von Scientific American.*



Wird die Kugel einer elektromechanischen Maus auf der Schreibtischplatte oder auf dem so genannten Mauspad verschoben, überträgt sie ihre Bewegungen auf zwei rechtwinklig zueinander angeordnete Rollen. Auf diese Weise lassen sich die waagerechte und die senkrechte Bewegungskomponente trennen. Ein Lichtstrahl fällt durch die mitdrehenden Lochscheiben beziehungsweise wird unterbrochen. Fotozellen erfassen die Lichtimpulse und wandeln sie in vom Rechner verwertbare elektrische Signale um; dieser verarbeitet auch die Mausklicks.



Die erste Maus des Erfinders Douglas Engelbart steckte in einem hölzernen Gehäuse.



1981 Xerox-Star

1987 Die klassische Microsoft-Maus

Linse
Kamera und Signalprozessor
an Unterlage reflektierter Lichtstrahl
Prisma
LED

Bei optischen Computermäusen wird das Licht einer Leuchtdiode (LED) von der Arbeitsoberfläche reflektiert. Eine Miniaturkamera nimmt pro Sekunde etwa 1500 Bilder auf, die ein digitaler Signalprozessor (DSP) hinsichtlich der Mausbewegung auswertet.

Die Bewegung der Maus entlang der X- und Y-Achse steuert den Cursor auf dem Bildschirm. X und Y stehen für den Punkt des Koordinatensystems, wo sich der Cursor gerade befindet.



Wussten Sie schon ... ?

➤ **Das Scripps-Institut** für Ozeanografie in La Jolla (Kalifornien) entwickelte vor wenigen Jahren eine tiefseetaugliche Computermaus. Dazu variierten die Wissenschaftler eine kommerzielle optische Maus. Sie fertigten ein Gehäuse aus wasserdichtem Acryl und ersetzten die Druckfedern der Tasten durch piezoelektrische Kristalle. Die ignorieren den hohen Druck der Umgebung und reagieren nur auf Druckänderungen etwa bei Betätigung der entsprechenden Taste durch einen Taucher.

➤ **Douglas Engelbart** entwickelte seine Maus am Stanford Forschungsinstitut in Kalifornien im Rahmen eines größeren Projekts. 1968 präsentierte er sein oNLine System (NLS): Die allererste Maus in der rechten und eine „Klaviatur“ aus fünf Tasten in der linken Hand öffnete und veränderte er Menüfenster, unterlegte Texte, klickte Hypertext-Links vernetzter Rechner an und nahm dabei sogar an einer Videokonferenz teil.

➤ **X-Y-Positionsanzeiger** nannte Engelbart sein Gerät etwas umständlich. Im Amerikanischen Sprachgebrauch funktioniert die *mouse* inzwischen auch als Verb, und es wird von Herstellern gern von ganz neuen *mousing*-Erfahrungen gesprochen.



ABBILDUNGEN: GEORGE RETSECK; BOOTSTRAP INSTITUTE (FOTOS VON D. ENGELBART); DEANNA HORVATH, MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON XEROX PARC (XEROX STAR); MICORSOFT (KLASSISCHE UND OPTISCHE MAUS); LOGITECH (FUNKMAUS)



2000 Microsoft Trackball Explorer, eine optische Maus



2001 Logitech MouseMan, die optische Funkmaus

KUNSTGESCHICHTE

Kunstvolles Original oder geniale Fälschung?

Ob eine teure Maleremaille wirklich aus der Renaissance stammt oder aus einer Werkstatt des 19. Jahrhunderts, vermag die kunsthistorische Stilanalyse schwer zu entscheiden. Die Analyse der chemischen Zusammensetzung ist da schon eindeutiger.

Von Heike Bronk und Irmgard Müsch

Auch versierten Kunstkennern unterlaufen peinliche Fehler. Als der begeisterte Sammler Baron Alphonse de Rothschild um 1880 einen neu erworbenen Altar des 16. Jahrhunderts im Bekanntenkreis vorführte, nahm ihn ein Besucher beiseite. Was da mit wunderbar farbenprächtigen Emailleplatten verziert vor aller Augen stand, erkannte dieser als geschickte Kopie; das Original befand sich in Italien. Rothschild verklagte seinen Lieferanten, und wirklich brachte der Prozess die Hintergründe ans Licht: Der Kunsthändler, mit der Restaurierung des Originals beauftragt, hatte die Gelegenheit zur dreisten, allerdings geschickten Fälschung genutzt.

Dieser Betrug war beileibe kein Einzelfall, wie schon der Schriftsteller Paul Eudel 1885 in seinem Buch „Fälscherkünste“ berichtet hat. Wie viele Stücke so genannter Maleremaillen in privaten und staatlichen Sammlungen wirklich aus der französischen Stadt Limoges stammen, in der Renaissance-Hochburg dieser Technik, und wie viele erst im 19. Jahrhundert im Zuge eines regelrechten Emaillebooms angefertigt wurden, vermag heute tatsächlich kaum jemand zu sagen. Denn die Künstler signierten ihre Werke selten und bemühten sich auch kaum um eine eigene Handschrift, die eine Zuordnung zu Personen einfach machen würde. Sie verstanden sich vielmehr als Handwerker, die mit großem Geschick Holzschnitte und Kupferstiche ihrer Zeit auf die Emaille übertrugen.

Wie auch in anderen Handwerkszweigen gibt es kaum schriftliche Überlieferungen zur Technik aus dem 16. Jahrhundert. Denn das Wissen wurde innerhalb der Familie weitergegeben und sicherte ihren Broterwerb, im Falle der Limousiner Maleremaillen geschützt durch königliche Privilegien. Mindestens zwei Familien arbeiteten aber auch im späten 17. und im 18. Jahrhundert und bewahrten das Wissen um ihre Kunst. Zudem bemühten sich Emailleure des 19. Jahrhunderts, die Arbeitsschritte zu rekonstruieren.

Ihre Materialien für den Farbauftrag bezogen die Emailleure von Glashütten. Dort mischte man Sand oder Quarz mit alkalihaltigen Flussmitteln wie Soda und Pottasche oder Kalisalpeter. Dieses Gemenge wurde aufgeschmolzen zum transparenten „Fluss“. Metalloxide verliehen ihm die gewünschte Farbe: Eisen- und Kupferoxid ergaben Grün, Gelb-Braun oder auch Rot; geröstetes Kobalterz Blau; ein manganhaltiges Mineral aus der Umgegend erzeugte violette, braune und schwarze Töne (die Glasmacher vermochten dies genau zu steuern); Weiß entstand durch Beimengung von Blei- und Zinnoxid zum Fluss. In der Emaillierwerkstatt wurden diese „Rohemaillen“ gemahlen und gewaschen, anschließend mit Wasser oder öligen Bindemitteln zu Pasten angerührt.

Der Kupferträger würde sich bei Erwärmung stärker ausdehnen als das Glas, umgekehrt bei fallenden Temperaturen deutlicher schrumpfen. Es entstünden mechanische Spannungen, und die Farbschichten könnten reißen oder gar abplatzen. Um das zu vermeiden, wurde auf der Rückseite des Metallträgers eine Gegenemaille aufgebrannt, welche die Verformung des metallischen Trägers begrenzt. Erst dann gestaltete der Emailleur die Bildseite und trug mit Nadeln, Spateln oder Federkielen die Pasten auf, variierte die Dicke der Farbschichten oder kratzte Konturen wieder heraus. Zwischen drei und fünf Arbeitsphasen waren erforderlich, jede schloss mit einem rund zweiminütigen Brennen bei etwa 760 bis 850 Grad Celsius ab – eine Kontrollmöglichkeit über den Fortgang hatte der Emailleur nicht. Für den letzten Feuerungsschritt brachte er mit dem Pinsel Dekorationen etwa aus Gold auf.

Eine Besonderheit war die so genannte Grisaille-Technik (Graumalerei):



Kopien in Glas und Kupfer

Die Limousiner Emailleure verstanden sich eher als Kunsthandwerker denn als Künstler. Statt eigene Darstellungen zu kreieren, nutzten sie beliebte Motive als Anregung. Als König François I. (1494–1547) Maler und Stuckateure aus der Schule des berühmten italienischen Malers und Baumeisters Raffael (1483–1520) für Schloss Fontainebleau engagierte, dienten deren Werke bald als Vorlagen für Maleremaillen. Die Kupferstich-Vorlage (rechts) für die hier abgebildete Version von Raffaels „Urteil des Paris“ lieferte Marcantonio Raimondi. Die Geschichte des troianischen Prinzen, der bei einem Schönheitswettbewerb dreier Göttinnen der Aphrodite einen goldenen Apfel als Zeichen ihres Sieges überreicht, erfreute sich großer Beliebtheit bei den Emailleuren. Doch ein Beleg für eine Abstammung aus der Renaissance ist das nicht – Fälscher nutzten die gleichen Vorlagen.

Vom Grubenschmelz zur Maleremaille

Das Aufschmelzen einer eingefärbten Glasmasse auf einem Metallträger kannte man schon im antiken Rom, und dieses Kunsthandwerk erlebte im Mittelalter eine besondere Blütezeit. Zunächst verzierte man Kirchengeräte mit so genanntem Grubenschmelz: In eine Kupferplatte wurden Vertiefungen eingelassen und mit der Glasmasse verfüllt. Ein Beispiel ist das unten abgebildete Reliquiar mit Darstellungen der Ermordung Thomas Beckets (Limoges, etwa 1180 – 1190).

In der Renaissance gelang es, mit Pasten von angerührtem Glaspulver auf einem Metallträger regelrecht zu malen. Zur Hochburg der neuen Technik entwickelte sich im späten 15. Jahrhundert Limoges, eine Stadt in Zentralfrankreich, heute Hauptstadt der Region Limousin. In strahlenden Farben fertigten Emailleure religiöse Darstellungen im Auftrag des Klerus. Die „Gefangennahme Christi“, eine fast 22 mal 18 Zentimeter große Darstellung, stammt vermutlich aus der Schule des Jean I. Pénicaud. Wertvolles Blattsilber unter dem Glasfluss verstärkte die leuchtende Wirkung.



HERZOG ANTON ULRICH-MUSEUM, BRAUNSCHWEIG

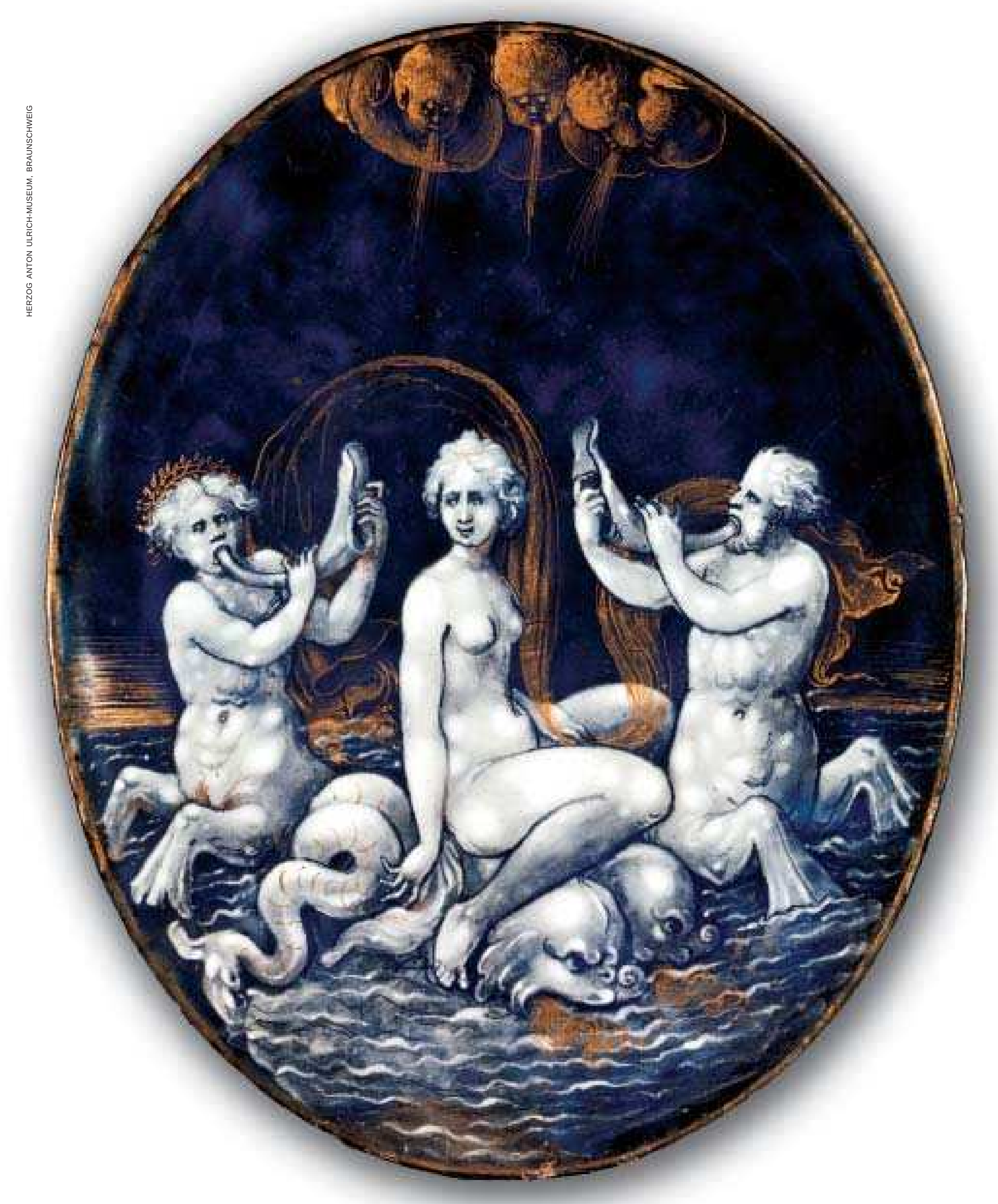
RMN / LOUVRE

Der Emailleur trug die Bilder in Weiß auf einem dunkelblauen oder schwarzen Grund auf, je nach Dicke der Weißschicht schimmerte dieser durch und ergab den Grauton. Hautfarbene Partien malte er abschließend mit Eisenoxid-Rot.

Analysen von stilistischen Merkmalen und technischer Ausführung ermöglichen es Kunsthistorikern, die Eigentümlichkeiten der Renaissance auszumachen und auf dieser Grundlage Einzelstücke oder Teile davon einer späteren Zeit zuzuordnen. So wurde etwa die Farbe Rot bei der Renaissance-Emaille nur spärlich eingesetzt, da das damals verwendete Kupferrubin bei Hitze leicht braun wurde. Doch oft reichen solche Hinweise für eine klare Entscheidung nicht aus. Erst die Einbeziehung naturwissenschaftlicher Methoden verspricht hier Erfolg.

Bislang gibt es zwar kein Verfahren, die Grundmaterialien Metall und Glas direkt zu datieren (bei organischen Stoffen beispielsweise lässt sich das Alter mittels Radiokarbon-Methode bestimmen). Aber eine vergleichende spektroskopische Analyse von Referenzobjekten und fraglichen Stücken bringt in diesen Fragen schon weiter. Dazu benötigt der hier einbezogene Naturwissenschaftler allerdings auch Wissen um die Techniken der möglichen Zeiten. So wurden zum Beispiel erst im 19. Jahrhundert Chrom und Uran vor allem für Grüntöne beziehungsweise Gelb und Beige verwendet. Natriumtetraborat (Borax) kam ebenfalls erst in neuerer Zeit als Flussmittel in Frage, da es zuvor aufwendig aus Tibet importiert werden musste und daher in großen Mengen unerschwinglich war. Opake Emaillen enthielten vor dem 18. Jahrhundert Zinnoxid als Trübungsmittel, erst dann kam auch Bleiarsenat in Gebrauch. Finden sich also entsprechende Elemente im Glas der Emaille, ist eine zeitliche Orientierung möglich.

Auch Neben- und Spurenelemente wie Phosphor, Chlor, Barium und Rubidium geben einen Anhaltspunkt für die Datierung. Sie gelangten als Verunreinigungen der Rohstoffe in die Schmelze, und zwar in der Renaissance mehr als in späterer Zeit. Im Laufe der Jahrhunderte half nämlich das zunehmende Wissen in der Chemie, die Ausgangssubstanzen der Glasflüsse und Farben immer reiner aus ihren Rohstoffen zu gewinnen und so Prozessschwankungen zu vermeiden. Beispielsweise stammte der blaue Farbstoff Kobalt aus Erzmineralen, die Kobaltarsenid, aber auch Anteile von Nickel und Bismut enthielten. Im 16. Jahrhundert wurde das Erz durch Rösten aufbereitet, dabei blieben die Verunreinigungen erhalten. Erst im 19. Jahrhundert ge-



HERZOG ANTON ULRICH-MUSEUM, BRAUNSCHWEIG

Limoger Emaille kommt in Mode

Weltliche Motive tauchten in den Limousiner Maleremaillen erst nach 1530 auf. Hier wird die Erzählung „Amor und Psyche" des römischen Schriftstellers Apuleius zitiert. Die schöne Psyche musste im Auftrag der eifersüchtigen Venus zahlreiche Abenteuer bestehen, bevor sie zum Olymp getragen wurde und dort die Liebe Amors gewann und Unsterblichkeit erlangte.

Der Wandel vom religiösen Andachtsbild zur künstlerischen Erzählung spiegelt auch eine Veränderung der Funktion von Maleremaillen: Sie wurden Bestandteil höfischer Kultur. Kannen und Schalen bildeten bei Banketts ein Schaubüfett und dienten somit der Unterhaltung bei Tisch. Die französischen Könige François I. und Henri II. (1519–1559) verliehen einzelnen Familien in Limoges das exklusive Recht, solche Emaillen herzustellen. Darüber hinaus ernannten sie zwei Emailleure, Léonard Limosin und Pierre Courteys, zu Hofkünstlern. Zwar tauchten in der Folgezeit häufiger signierte oder mit Initialen versehene Stücke auf, doch hatten diese vermutlich mehr den Charakter eines Markenzeichens. Im 19. Jahrhundert wurden solche Signaturen nachgetragen oder gefälscht.

Die dunklen Jahre

Um 1650 bekam das Limousiner Kunsthandwerk Konkurrenz. Die Kundschaft bevorzugte Miniaturmalerei mit Metalloxiden auf Emaillegrund; ein Beispiel ist das nebenstehende Miniaturporträt König Ludwigs XIV. (1638–1715) von Jean Petitot (1607–1691) (Emaille auf Goldgrund). Weitere Wettbewerber waren chinesisches Porzellan und Goldschmiedekunst. Mehr und mehr Kunsthandwerker wandten sich der Porzellanmalerei zu. Was mit bereits vorhandenen Stücken geschah, ist kaum bekannt. So besaß Herzog Anton Ulrich von Braunschweig etwa 200 Werke, die sich heute im Besitz des gleichnamigen Museums befinden; auch Herzog August von Sachsen hatte um 1700 zahlreiche Stücke erworben.

Während der französischen Revolution (1789–1799) gelangten viele Stücke aus dem Besitz von Adel und Kirche in den Handel. Mit dem wachsenden Interesse an der eigenen Nationalgeschichte erfuhren die alten Kunstwerke nun eine erneute Wertschätzung und wurden 1791 erstmals in einem Museum, dem Musée des Monuments Français in Paris, ausgestellt.



VICTORIA AND ALBERT MUSEUM LONDON, FOTO: ERIKA SPEEL

lang es, aus den Rohstoffen reines Kobaltoxid durch chemische Verfahren zu gewinnen. Das Fehlen solcher Beimengungen allein gibt zwar noch keine hundertprozentige Gewissheit, denn Emailleure pflegten ihre Materialien durchaus an Nachfolger weiterzugeben – es waren ja nur geringe Mengen nötig. Doch die Summe aller Informationen ergänzt die Stilanalysen.

Allerdings sollten die wertvollen Einzelstücke nicht durch die Entnahme auch noch so kleiner Proben beschädigt werden. Ein „zerstörungsfreies“ Prüfverfahren ist vonnöten. Zudem wäre ein Transport in ein Labor außerhalb des jeweiligen Museums zu riskant und aufwendig. Deshalb konzipierten das Institut für Gerätebau Berlin-Adlershof und das Institut für Chemie der Technischen Universität Berlin im Rahmen eines Verbundprojekts mit der Bundesanstalt für Materialforschung und der intax GmbH ein mobiles Spektrometer. Grundlage ist die so genannte Mikroröntgenfluoreszenzanalyse. Dieses Verfahren ermöglicht, die elementare Zusammensetzung eines Stoffes zu ermitteln. Die Finanzierung des Projekts übernahmen die Stiftung Niedersachsen sowie das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Vereinfacht gesagt, schlagen die Röntgenphotonen Elektronen aus der Elektronenhülle der bestrahlten Atome heraus, im weiteren Verlauf rücken andere Elektronen aus der Hülle in diese Lücken nach. Weil sie dabei aber von höheren Energieniveaus herabfallen, haben sie nun überschüssige Energie. Diese Differenz wird als Fluoreszenzlicht ausgesendet und zwar – weil sehr energiereich – wieder als Röntgenstrahlung. Da sich die chemischen Elemente in der Struktur ihrer Elektronenhülle unterscheiden, liest sich das ausgesandte Energiespektrum wie ein Fingerabdruck. Bestrahlt man also einen Fleck auf einer Emaille, überlagern sich solche Einzelspektren zu einem Gesamtbild, zu dem einzelne Elemente charakteristische Energien beitragen. Aus der Intensität der freigesetzten Strahlung lässt sich dann sogar der Anteil des Elements in der Probe ermitteln.

Normalerweise finden solche spektroskopischen Analysen denn auch in speziellen Labors statt, erfordern möglicherweise sogar den Synchrotron-Speicherring eines Elektronenbeschleunigers, der besonders intensive Strahlung erzeugt. Die Mikroröntgenfluoreszenzanalyse kommt mit geringerem Aufwand aus. Der anregende Strahl wird nämlich auf einen Brennfleck von 80 bis 100 Mikrometern (tausendstel Millimetern) Durchmesser fokussiert. Dort herrscht dann die notwendige hohe Intensität, selbst wenn die Ausgangsleistung der Röntgenröhre der herkömmlicher Geräte in einer Zahnarztpraxis vergleichbar ist. Ein weiterer Vorteil der Fokussierung: Der Strahl kann so auch winzige Farbpartikel erfassen. Schließlich entfällt bei dieser Konfiguration auch die sonst nötige Vakuumkammer: Eine Heliumspülung verdrängt die Luftmoleküle, welche die Fluoreszenzstrahlung absorbieren würde.

Zur Bündelung von Röntgenlicht bedarf es allerdings spezieller Optiken. Seit den 1980er Jahren verwenden Physiker zu diesem Zweck Glaskapillaren: Luft und Vakuum sind – anders als für sichtbares Licht – für Röntgenstrahlen op-

Eine Renaissance der Renaissance

Öffentliche Messen und Gewerbeausstellungen bis hin zu den Weltausstellungen in Paris und London Mitte des 19. Jahrhunderts brachten einen neuerlichen Boom der Maleremaillen. Wachsende Nachfrage und damit steigende Preise motivierten Emailleure und Kunsthändler, beschädigte Stücke zu restaurieren oder um Details zu ergänzen. Die nie ganz erloschene Tradition der Limousiner Handwerkerfamilien erblühte wieder. In der Porzellanmanufaktur in Sèvres bei Paris entstand 1845 ein Atelier für historische Emailleproduktion. Nacharbeiten von Originalen, die später vielleicht irrtümlich als Werke der Renaissance angesehen wurden, gelangten ebenso in Sammlungen und Museen wie Fälschungen.

Die im Beitrag vorgestellte Mikroröntgenfluoreszenzanalyse hilft zwischen Original- und Nacharbeiten zu unterscheiden. So ist das nebenstehende Porträt der spanischen Königin Isabella zwar technisch hervorragend gearbeitet und entspricht dem Stil der Renaissance, doch die spektroskopisch ermittelte chemische Zusammensetzung spricht eher für ein späteres Entstehungsdatum.



HERZOG ANTON ULRICH-MUSEUM, BRAUNSCHWEIG

tisch dichter als Glas; in einem solchen hohlen Glasröhrchen werden die Wellen deshalb vollständig reflektiert (Wellenleiter für sichtbares Licht etwa in den Glasfasernetzen der Telekommunikation nutzen ebenfalls die Totalreflexion, benutzen aber Glas- oder Kunststofffasern, die mit einem optisch dünneren Material ummantelt sind). Hunderttausende solcher Kapillaren ergeben eine wabenartige Optik, die Röntgenlicht nicht nur zu leiten, sondern bei einer zigarrenförmigen Geometrie auch zu bündeln vermag.

Das eigens entwickelte Gerät lässt sich in jedem Museum in einem separaten Raum rasch aufbauen; eine wenige Zentimeter dicke Bleiwand schützt den Untersucher während der Messung gegen die Strahlung. Der Prototyp ermöglicht, selbst noch 20 Mikrogramm eines Elements pro Gramm Probe nachzuweisen, das sind 0,002 Gewichtsprozent.

Seit Dezember 2000 ist das System im Einsatz, insgesamt haben wir etwa 120 Maleremaillen aus den wichtigsten deutschen Sammlungen untersucht. Langsam beginnen sich die Befunde zu einem Gesamtbild zu fügen, und eine umfangreiche Datenbank der in den jeweiligen Epochen verwendeten Materialien entsteht als Referenz für spätere Untersuchungen. Dabei entpuppten sich bereits einige Stücke als Fälschungen, während bei anderen stilistische Zweifel nicht bestätigt werden konnten. Damit scheint es durchaus angeraten, auch manche Zuschreibung von Maleremaillen zu den bekannten Werkstätten neu zu überdenken.

Das Spektrometer wird mittlerweile von der Berliner Firma intax in Serie produziert und steht damit einem breiteren Anwenderkreis zur Verfügung. Zweifelhafte Maleremaillen in den Sammlungen von Museen und Privatleuten sollten sich künftig sicherer datieren lassen, und sei es nur, um ihre kunsthistorische Zuschreibung zu untermauern und einen Fälschungsverdacht auszuräumen. Darüber hinaus erhoffen sich Fachleute, aus den Analysen besser als bislang die Gepflogenheiten der verschiedenen Werkstätten zu ergründen. Und schließlich: Ob Maleremaille oder Gemälde, Glasfluss oder Metallobjekt – das Röntgenlicht enthüllt die Zusammensetzung jeder anorganischen Verbindung. ■

Dr. Heike Bronk *(links) entwickelt spektrometrische Verfahren für Kunstobjekte am Institut für Anorganische Chemie der Technischen Universität Berlin. Die Kunsthistorikerin* ***Dr. Irmgard Müsch*** *erstellt einen Katalog zu Maleremaillen am Herzog Anton Ulrich-Museum Braunschweig.*

Literaturhinweise

Maleremails aus Limoges – der Bestand des Berliner Kunstgewerbemuseums. Von Susanne Netzer, Staatliche Museen zu Berlin und G+H Verlag Berlin, 1999.

Emailmalerei. Von Alfred Walz. In: Kunst und Antiquitäten 4, 1990, S. 26.

Microscopic X-Ray Fluorescence Analysis. Von K. H. A. Janssens et al. (Hg.). Wiley 2000.

HYPERCOMPUTER (TEIL II)

Der selbst gebastelte Supercomputer

Wer ein großes, gewaltigen Rechenaufwand erforderndes Problem zu lösen hat, muss nicht unbedingt den modernsten, sündhaft teuren Parallelrechner in Anspruch nehmen. Mit geeigneter Verkabelung und Software tut es auch ein Haufen schrottreifer PCs.

Von William W. Hargrove, Forrest M. Hoffman und Thomas Sterling

Ein hungriger Wanderer kommt mit einem Kessel in ein armes Dorf und verspricht, er werde aus nichts weiter als einem glänzenden Stein und Wasser eine köstliche Suppe kochen. Mit ein wenig Kohl schmecke sie allerdings noch etwas besser … Zuerst sind die Dorfbewohner skeptisch, doch dann bringen sie kleine Gaben: einen Kohlkopf, ein Bündel Karotten, ein Stückchen Fleisch. Am Ende ist der Kessel mit genügend herzhafter Suppe gefüllt, um alle satt zu machen. Und die Moral von der Geschichte: Durch Kooperation kommen bedeutende Leistungen zu Stande, selbst mit bescheidenen und anscheinend unbedeutenden Zutaten.

So geht die Geschichte von der Steinsuppe, die in vielen Variationen erzählt wird. Und ausgerechnet in der Hochtechnologie wird dieses Märchen wahr: Aus Material, das andere Leute weggeworfen hätten, entstehen Supercomputer, also leistungsstarke Rechner, die Milliarden von Rechenoperationen pro Sekunde ausführen können.

Ein Supercomputer ist heute in der Regel ein Parallelrechner: Zahlreiche ultraschnelle Mikroprozessoren arbeiten gleichzeitig an der Lösung hochkomplexer Probleme wie der Vorhersage des Wetters oder der Simulation einer Kernwaffenexplosion (Hypercomputer (Teil I): „Auf dem Weg zum Billiarden-Rechner“, Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 78). Diese Rechner werden von renommierten Firmen wie IBM oder Cray hergestellt und kosten meist mehrere zehn Millionen Dollar – viel zu teuer für eine Forschungsgruppe mit bescheidenem Budget. Aus dieser Not machten Wissenschaftler an nationalen Forschungszentren und Universitäten in den letzten Jahren eine Tugend: Schließlich steckt in jedem billigen PC ein Mikroprozessor. Also übten sich die Wissenschaftler in der Kunst, durch geeignete Datenleitungen und Programme die vielen PCs so zusammenarbeiten zu lassen, als steckten sie alle im Gehäuse eines Superrechners.

Für zwei von uns (Hargrove und Hoffman) entstand der Bedarf an großer Rechenleistung 1996 bei unserer Arbeit am Oak Ridge National Laboratory (ORNL) in Tennessee. Wir wollten die Fläche der USA nach Ökoregionen kartieren, das heißt nach Gebieten gleicher Umweltbedingungen wie Klima, Oberflächengestalt und Bodenbeschaffenheit. Dazu teilten wir das Land (ohne die Inseln) in 7,8 Millionen quadratische Zellen ein, jede mit der Fläche von einem Quadratkilometer. Für jede Zelle mussten wir 25 Variablen berücksichtigen, von der durchschnittlichen monatlichen Niederschlagsmenge bis zum Stickstoffgehalt des Bodens. Ein einzelner PC oder eine Workstation hätte diese Aufgabe nicht bewältigen können. Wir benötigten einen Parallelrechner, und zwar einen, den wir uns leisten konnten!



Die Lösung unseres Problems fanden wir im Wortsinne auf dem Schrott. Wir bauten einen Verbund (einen *computing cluster*) aus veralteten PCs, die das ORNL ansonsten weggeworfen hätte, und nannten ihn Stone SouperComputer („Steinsuppen/Super-Computer"), weil wir die Zutaten praktisch geschenkt bekommen hatten. Das Gerät war leistungsfähig genug, unsere Ökoregionen-Kartierung in unübertroffener Qualität zu bewältigen. Andere Forschungsgruppen haben dasselbe Bauprinzip noch wesentlich weiter getrieben: Ihre Rechencluster nehmen es an Leistung mit den besten Computern der Welt auf – für einen Bruchteil der Kosten. Dieses vorteilhafte Preis-Leistungs-Verhältnis hat bereits die Aufmerksamkeit einiger Unternehmen erregt, die so komplexe Aufgaben wie die Entschlüsselung des menschlichen Genoms mit Clustern angehen wollen (siehe auch den Beitrag auf Seite 94/95). Insgesamt verspricht das Konzept des Rechenclusters, das Hochleistungsrechnen zu revolutionieren, indem es praktisch jedem – Kleinunternehmen, Ingenieurbüro, Schule … – eine gewaltige Rechenleistung bietet.

Beowulf: der schmächtige Held unter den Supercomputern

Das Prinzip, Computer zu gemeinsamer Arbeit zu verkoppeln, ist nicht neu. Bereits in den fünfziger und sechziger Jahren schaltete die amerikanische Luftwaffe Computer, damals noch in Röhrentechnik, zu einem Raketen-Frühwarnsystem namens SAGE zusammen. Mitte der achtziger Jahre prägte die Digital Equipment Corporation (DEC) den Begriff „Cluster" für integrierte Systeme aus mittelgroßen VAX-Minicomputern. In der wissenschaftlichen Welt wurde es bald darauf üblich, Workstations, Computer, die in der Leistungsfähigkeit zwischen einem Minicomputer und einem PC liegen, zu vernetzen. Die Idee, Cluster aus PCs zu bauen, kam Anfang der Neunziger auf, einerseits weil deren massenproduzierte Mikroprozessoren so billig geworden waren, vor allem aber, weil die Kosten für das Ethernet, die Standard-Verbindungstechnik für lokale Netze, dramatisch gefallen waren.

Außerdem ebneten Fortschritte in der Software den Weg für PC-Cluster. In den Achtzigern hatte sich Unix als das dominierende Betriebssystem für wissenschaftliche und technische Berechnungen durchgesetzt. Die Betriebssysteme für PCs konnten allerdings mit dessen Leistungsfähigkeit und Flexibilität nicht mithalten. Da entwickelte 1991 ein finnischer Student namens Linus Torvalds im Alleingang ein Betriebssystem namens Linux, das ähnlich wie Unix arbeitete, aber auch ▶

Diese Anhäufung alter PCs im Nationallaboratorium in Oak Ridge (Tennessee) trägt den Spitznamen Stone SouperComputer („Steinsuppen-Computer"); es handelt sich in der Tat um einen Super-(Hochleistungs-)computer.



ALLE FOTOS: KAY CHERNUSH

auf PCs lief. Torvalds machte Linux kostenlos im Internet verfügbar, und schon bald begannen Hunderte von Programmierern Verbesserungen beizutragen. Mittlerweile ist Linux ein höchst populäres Betriebssystem für Einzelcomputer; aber es ist auch für Cluster ideal geeignet.

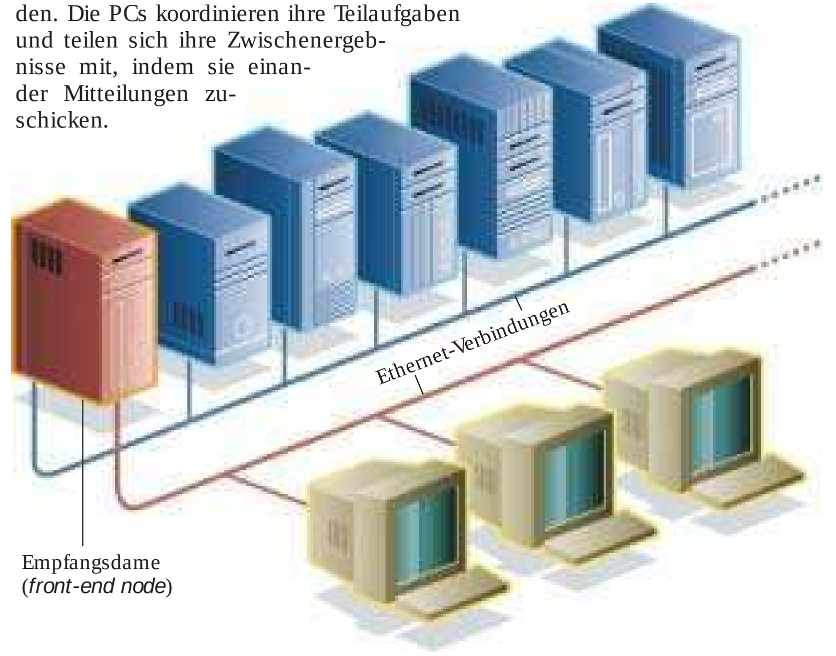
Der erste PC-Cluster entstand 1994 am Goddard-Raumflugzentrum der Nasa. Die Luft- und Raumfahrtbehörde suchte für die typischen Rechenprobleme der Erd- und Weltraumwissenschaft einen Rechner mit einer Leistung von einem Gigaflops, das sind eine Milliarde elementare Rechenoperationen pro Sekunde. Damals kostete jedoch ein kommerzieller Supercomputer dieser Größe ungefähr eine Million Dollar – zu viel, um ihn einer einzelnen Forschergruppe exklusiv zur Verfügung zu stellen.

Einer von uns (Sterling) entschied sich für das damals radikale Konzept, einen Rechencluster aus PCs zu bauen. Sterling und sein Kollege Donald J. Becker verbanden 16 PCs, die jeder einen Mikroprozessor vom Typ Intel 486 enthielten, unter dem Betriebssystem Linux mit der für lokale Netze üblichen Verkabelung, dem so genannten Ethernet. Bei wissenschaftlichen Anwendungen vollführte der Cluster im Dauerbetrieb 70 Millionen Gleitkommaoperationen pro Sekunde (70 Megaflops). Nach heutigen Maßstäben ist das nicht viel, kam aber der Leistung eines kleineren kommerziellen Supercomputers dieser Zeit schon ziemlich nahe, und das für ein Zehntel des Preises: nur 40 000 Dollar.

Die Nasa-Forscher nannten ihren Cluster Beowulf, nach dem schmächtigen Helden einer frühmittelalterlichen Legende, der das riesige Monster Grendel besiegte, indem er ihm einen Arm ausriss. Seitdem hat sich Beowulf als Name für jeden kostengünstigen Cluster aus kommerziell verfügbaren PCs eingebürgert. Der ursprüngliche Cluster fand 1996 zwei Nachfolger: Hyglac am California Institute of Technology gemeinsam mit dem Jet Propulsion Laboratory in Pasadena und Loki am Nationallaboratorium in Los Alamos. Beide bestanden aus 16 Mikroprozessoren vom Typ Intel Pentium Pro und lieferten eine Dauerleistung von über einem Gigaflops bei Kosten von weniger als 50 000 Dollar, womit eine Zielvorgabe der Nasa erreicht wurde.

Ein wilder Haufen von Rechnern

Der Stone SouperComputer am Nationallaboratorium in Oak Ridge (Tennessee) besteht aus mehr als 130 PCs, die zu einem Cluster („Haufen“) verknüpft sind. Einer der Rechner dient als „Empfangsdame“: Er hat zwei Ethernetkarten, eine für die Kommunikation mit der Außenwelt und die andere, um sich mit den anderen Knoten im Cluster zu verständigen. Das System löst Probleme durch parallele Verarbeitung, das heißt, es teilt die Rechenlast in viele Teilaufgaben auf, die den Knoten zugewiesen werden. Die PCs koordinieren ihre Teilaufgaben und teilen sich ihre Zwischenergebnisse mit, indem sie einander Mitteilungen zuschicken.



SAMUEL VELASCO

Für unser Problem, die Kartierung der Ökoregionen der Vereinigten Staaten, war offensichtlich ein Parallelrechner das Mittel der Wahl. Eine einzelne Workstation konnte allenfalls die Daten einiger Bundesstaaten auf einmal verarbeiten, und Teilprobleme an getrennte Workstations zuzuweisen war nicht sinnvoll, da die Daten jeder Region mit denen jeder anderen Region in Beziehung zu setzen waren (siehe Kasten Seite 92/93). Also stellten wir 1996 einen Antrag auf 64 Pentium-II-PCs, um daraus einen Beowulf-Cluster zu bauen. Leider konnten wir die Gutachter am ORNL nicht überzeugen.

Eine digitale Ausschlacht-Werkstatt

Unverdrossen sannen wir auf Abhilfe. Wir wussten, dass veraltete PCs am Standort des Energieministeriums in Oak Ridge regelmäßig durch neuere Modelle ersetzt wurden. Die alten Geräte wurden auf einer internen Website angeboten; es stellte sich bald heraus, dass Hunderte von veralteten Computern ihrer Entsorgung harrten. Vielleicht könnten wir uns ja aus den Dingern, die niemand mehr haben wollte, einen Beowulf-Cluster basteln. Wir besorgten uns einen Raum im ORNL, der vorher einen veralteten Großrechner beherbergt hatte, und sammelten dort überzählige PCs.

Das Prinzip hinter der parallelen Verarbeitung ist „Teile und herrsche“. Ein komplexes Problem ist in kleinere Teilaufgaben zu zerlegen. Jede Teilaufgabe wird dann einem „Rechenknoten“ zugewiesen: einem Prozessor innerhalb des Parallelrechners oder eben einem der PCs in einem Beowulf-Cluster. Jeder Knoten arbeitet selbstständig an seinem Teilproblem und tauscht gelegentlich Zwischenergebnisse mit seinesgleichen aus.

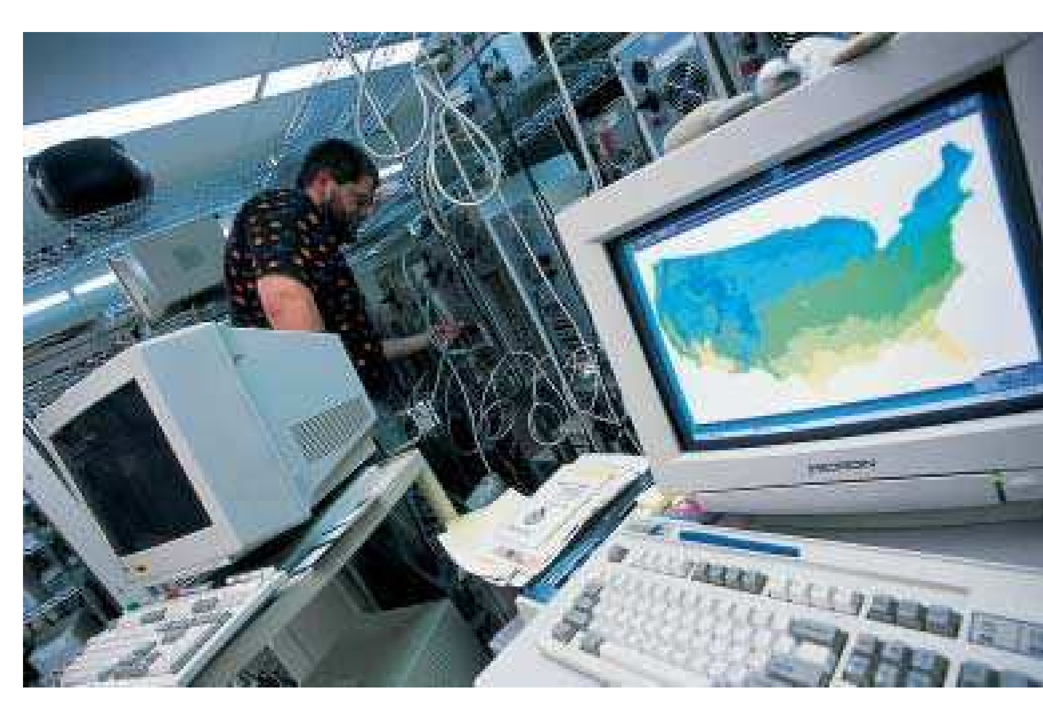
Bei den heutigen technischen Gegebenheiten lautet die Grundregel: Rechnen geht schnell, aber Kommunikation ist mühsam. Man zerlege daher das Problem möglichst so, dass alle Knoten viel zu rechnen und wenig zu kommunizieren haben, also in Teilprobleme, die möglichst nur lose miteinander zusammenhängen. Wie weit das gelingt, hängt weitgehend von der Natur des Problems ab. Eine „feinkörnige“ Zerlegung in sehr viele sehr kleine Teilprobleme gibt den Knoten wenig zu tun und viel zu reden, mit dem Ergebnis, dass sie sehr viel Zeit mit dem Warten auf Nachrichten verschwenden. Dagegen sind „grobkörnige“ Probleme für die Verarbeitung mit Parallelrechnern weitaus besser geeignet.

Für die Hardware zur Kommunikation innerhalb eines Beowulf-Clusters stehen im Prinzip das übliche Ethernet oder schnellere, spezialisierte Netzwerke wie Myrinet zur Auswahl. Unsere knappe Finanzausstattung ließ uns keine Wahl: Ethernet kostet keine Lizenzgebühren. Wir installierten in jeden PC des Clusters eine Ethernet-Karte zur Kommunikation der Knoten untereinander und in einen speziellen, unsere „Empfangsdame“ (*front-end node*), eine zweite Ethernet-Karte für die Kommunikation mit der Außenwelt. Vom Standpunkt des Programmierers findet die interne Kommunikation über das Weiterleiten von Nachrichten (*message passing*) statt: Ein Knoten schickt zu einem Zeitpunkt, den er selbst bestimmt, einem anderen seine neuesten Zwischenergebnisse über die Datenleitung. Die beiden meistverwendeten Programmsammlungen für diesen Zweck, das Message-Passing Interface (MPI) und die Parallel Virtual Machine (PVM), sind kostenlos im Internet verfügbar. Wir benutzen beide Systeme im Stone SouperComputer.

Viele Beowulf-Cluster sind homogen, das heißt aus lauter gleichen PCs aufgebaut. Das erleichtert die Bedienung der Geräte, ist aber nicht immer erforderlich. Da wir möglichst kein Schrottgerät ungenutzt verkommen lassen wollten, nahmen wir in Kauf, dass unser Stone SouperComputer wie jeder gute Eintopf aus den verschiedensten Zutaten bestehen würde. Wir begannen mit 486er PCs, verschmähten diese allerdings später zu Gunsten besserer Ware: Ein Pentium-Chip, mindestens 32 Megabyte Arbeitsspeicher und 200 Megabyte Festplattenspeicher sollten es schon sein.

Unter den PCs, die hereinkamen, erfüllten nur die wenigsten unsere Anforderungen. Wir gingen daher dazu über, wie ein Altautoverwerter die Geräte auszuschlachten und aus deren besten Teilen geeignete Knoten für unseren Cluster zu machen. Einen neu eintreffenden Rechner zu öffnen war fast so schön wie eine Weihnachtsüberraschung: Vielleicht würden wir ja diesmal eine große Festplatte, viel Speicher oder (am besten) ein Motherboard mit einem modernen Prozessor finden, das aus Versehen auf dem Schrott gelandet war? Na ja – meistens war es doch nur ein müder alter Veteran mit einem staubverstopften Lüfter.

Unser Raum in Oak Ridge verwandelte sich in eine Leichenhalle voll gefledderter Computer. An jedem einmal geöffneten Rechner befestigten wir einen „Leichenzettel“ mit der Angabe seiner brauchbaren Teile für spätere Verwendung. Wir entwickelten Vorlieben und Abneigungen für gewisse Marken, Modelle und Gehäuse und übten uns in der Kunst, den Passwordschutz des letzten Vorbesitzers unwirksam zu machen. Im Durchschnitt mussten wir fünf PCs einsammeln und auseinander nehmen, um einen guten Knoten herzustellen.



Das Diagnose-Mobil für defekte PCs innerhalb des Stone SouperComputers enthält Tastatur und Bildschirm, die der PC als Mitglied des großen Clusters eigentlich nicht mehr braucht. Links oben im Bild der Kessel für die Steinsuppe.

Chef und Sklaven

Um dem Cluster einen neuen Knoten hinzuzufügen, installierten wir Linux auf dem Rechner. Wir bekamen schnell heraus, wie wir Tastatur und Bildschirm für einzelne Knoten entbehrlich machen konnten. Wir bastelten uns mobile Werkstattwagen mit Bildschirm und Tastatur, die man zu Diagnosezwecken an defekte Knoten anschließen konnte (Bild oben). Schließlich kaufte uns sogar jemand, der selbst Platz in unserem Raum nutzen wollte, noch Regale für unsere Hardwaresammlung. Anfang 1997 führte der Stone SouperComputer sein erstes Programm aus; im Mai 2001 bestand er aus 133 Knoten, darunter 75 PCs mit 486er Prozessoren, 53 schnellere Rechner mit Pentium und fünf noch schnellere Alpha-Workstations von Compaq.

Modernisierungen am Stone SouperComputer sind einfach: Wir ersetzen immer den jeweils langsamsten Knoten durch einen besseren. Jeder Knoten lässt routinemäßig stündlich einen einfachen Geschwindigkeitstest laufen. Diese Geschwindigkeitswerte helfen uns bei der Feinabstimmung unseres Clusters. Anders als bei kommerziellen Rechnern verbessert sich die Leistung des Stone SouperComputers kontinuierlich, da der Zustrom immer besserer Schrott-Computer nicht versiegt.

Noch schwieriger als das Zusammenbauen der Hardware eines Parallelrechners ist zuweilen dessen Programmierung. Die Betreiber von Beowulf-Clustern folgen in der Regel dem „Master-Slave“-Schema: Ein Knoten ist der „Chef“; er verteilt die Aufgaben an eine oder mehrere Gruppen von „Sklaven“. Wir laden auf jeden Knoten das komplette Programm; Chef und Sklaven führen nur jeweils verschiedene Programmteile aus. Programmierfehler wirken sich noch wesentlich dramatischer aus als bei der herkömmlichen Programmierung, weil das Versagen eines Knotens eine Lawine von Fehlern in anderen Knoten auslösen kann. Die ursprüngliche Fehlerursache ist dann möglicherweise sehr mühsam zu eruieren.

Ein weiteres Problem ist die gleichmäßige Auslastung aller Knoten. Es wäre abwegig, jedem von ihnen die gleiche Arbeitslast zuzuweisen; denn da die einzelnen Mikroprozessoren sehr unterschiedlich leistungsfähig sind, müssten die schnellen beim Warten auf die langsamen viel Zeit vergeuden. Stattdessen lassen wir durch einen selbst entwickelten Algorithmus den Chef den schnellen Sklaven entsprechend mehr Stoff aufbürden. Obgleich sie in der Minderheit sind, erledigen sie so den größten Teil der Arbeit; immerhin tragen die langsameren ▶

Maschinen auch ihren Teil zur Gesamtleistung bei.

Für unsere Kartierung der Ökoregionen sah die Arbeitsteilung zwischen Chef und Sklaven wie folgt aus. Wir hatten enorme Datenmengen zu verarbeiten: 25 durch Zahlen ausgedrückte Umweltmerkmale von jeder der 7,8 Millionen Zellen vom Festland der USA. Jeder Datensatz einer Zelle entspricht einem Punkt in einem abstrakten 25-dimensionalen Raum, dessen Koordinaten den 25 Variablen (mittlere Temperatur, Niederschläge, Bodenfeuchtigkeit und so weiter) entsprechen (Bild *A* im Kasten unten). Wenn zwei dieser Punkte dicht beieinander liegen, dann haben ihre Zellen per Definition sehr ähnliche Merkmale; ob sie geografisch eng benachbart sind, ist unerheblich. So können zwei Berggipfel im Datenraum dicht beieinander liegen, weil sie nahezu dasselbe Klima, dieselben Bodenmineralien und so fort aufweisen, und in Wirklichkeit tausende Kilometer voneinander entfernt sein.

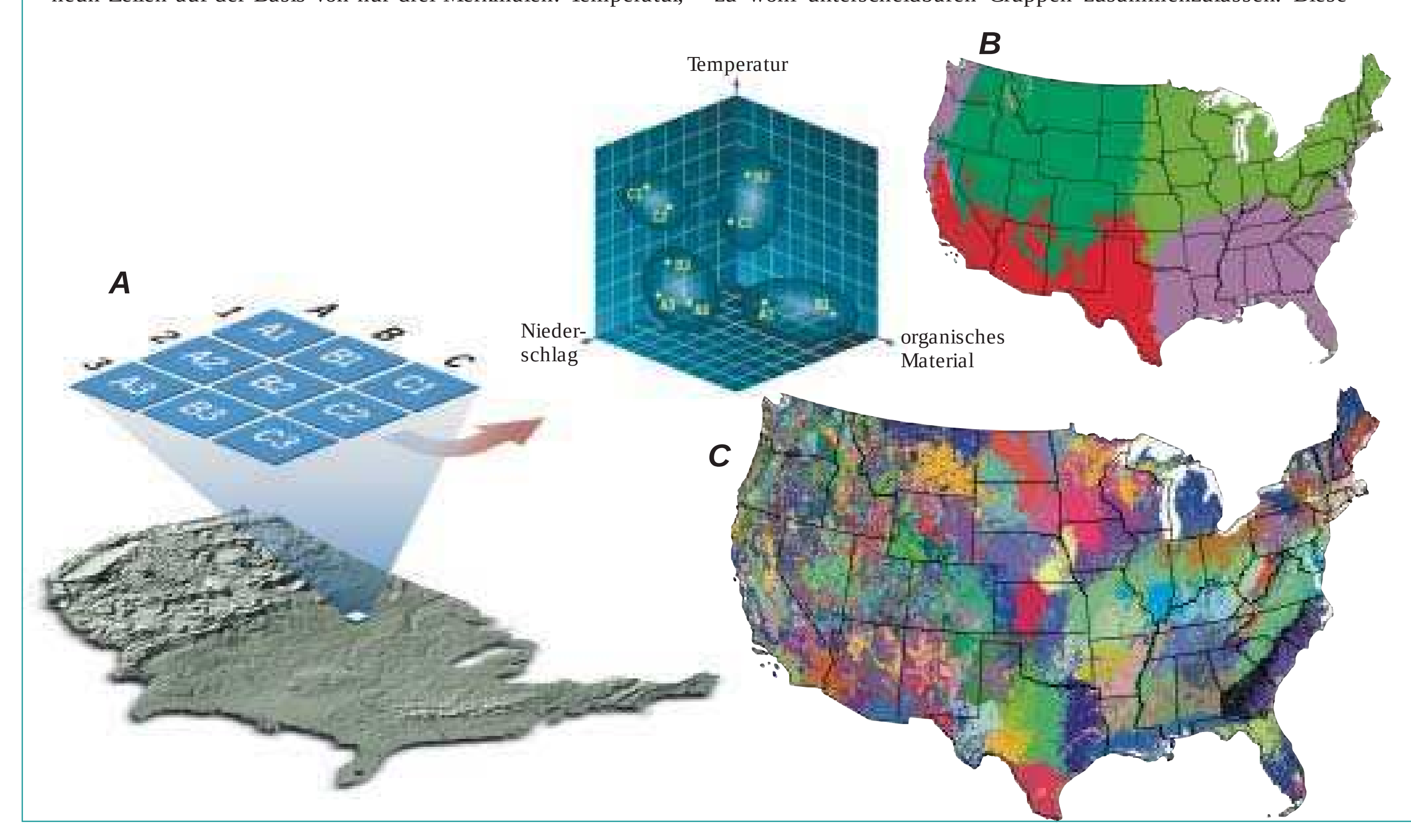
Diese 7,8 Millionen Punkte im Datenraum waren nun sinnvoll zu wohl unterschiedenen Teilmengen zusammenzufassen. Wenn der Datenraum nur dreidimensional wäre und man sich die Punktmenge von allen Seiten anschauen könnte, wäre die Sache relativ einfach. Man würde vielleicht entdecken, dass die Punkte sich an gewissen Stellen zu „Wolken“ häufen, und jede Punktwolke durch einen geeignet definierten Mittelpunkt charakterisieren. Jeder Punkt würde dann derjenigen Ökoregion (Wolke) zugerechnet, zu deren Mittelpunkt er am nächsten liegt.

Nun ist das, was das menschliche Sehsystem automatisch erledigt, algorithmisch eine hoch komplexe Aufgabe. Ein Computer kann nicht auf Anhieb Wolken sehen, einerlei, ob der Raum drei oder 25 Dimensionen hat. Stattdessen wird ein iteratives Verfahren angewandt: Man lässt das Programm zunächst genauso viele Punkte irgendwohin in den Datenraum legen, wie man am Ende Ökoregionen unterscheiden will. Diese Punkte sollen später die Mittelpunkte der Ökoregionen werden. Jeder dieser Mittelpunkts-Kandidaten sammelt dann gewissermaßen diejenigen Punkte um sich, die ihm näher liegen als jedem anderen Kandidaten. Diese bilden eine „vorläufige Ökoregion“. Das Programm berechnet nun den Schwerpunkt dieser Punktmenge, das heißt den Mittelwert aller ihrer Punkte, und ersetzt den bis-herigen Kandidaten durch diesen Schwerpunktswert. Danach läuft immer wieder dieselbe Folge von Aktionen ab: Die Punkte werden den Kandidaten zugeordnet, denen sie nunmehr am nächsten liegen; dadurch werden neue vorläufige Ökoregionen definiert und deren Schwerpunkte berechnet … In jedem Ite-

Ein Cluster findet Cluster

Die Öko-Kartierung der USA mit dem Steinsuppen-Computer

Für die ökologische Klassifizierung der Landfläche der USA waren für 7,8 Millionen Zellen von je einem Quadratkilometer Fläche 25 Umweltmerkmale in Beziehung zu setzen. Als vereinfachtes Beispiel betrachten wir die Klassifizierung von neun Zellen auf der Basis von nur drei Merkmalen: Temperatur, Niederschlagsmenge und organisches Material im Boden (*A*). Jede Zelle wird entsprechend den Werten dieser Merkmale einem Punkt in einem dreidimensionalen Datenraum zugeordnet. Aufgabe des Computerprogramms ist es nun, diese Datenpunkte zu wohl unterscheidbaren Gruppen zusammenzufassen. Diese



Literaturhinweise

How to Build a Beowulf. Von T. Sterling et al. (Hg.). MIT Press, 1999.

Cluster Computing: Linux Taken to the Extreme. Von F. M. Hoffman und W. W. Hargrove in: Linux Magazine, Bd. 1, Heft 1, S. 56, Frühjahr 1999.

Using Multivariate Clustering to Characterize Ecoregion Borders. Von F. M. Hoffman und W. W. Hargrove in: Computers in Science and Engineering, Bd. 1, Heft 4, S. 18, Juli/August 1999.

Weblinks bei ***www.spektrum.de*** *unter „aktuelles Heft“*

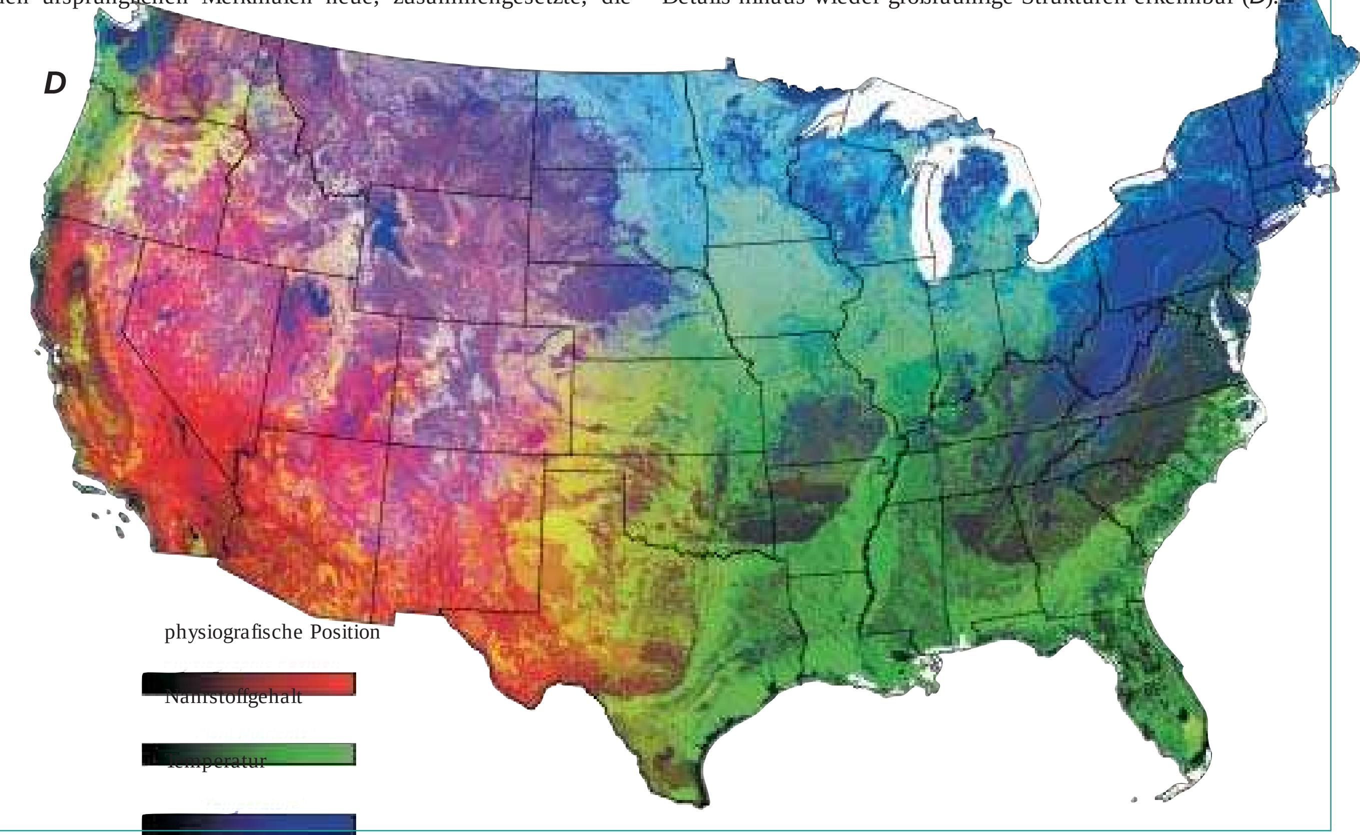
rationsschritt wechselt dieser oder jener Punkt von einem vorläufigen Ökosystem zum anderen. Die Klassifikation ist abgeschlossen, wenn dieser Wechselprozess im Wesentlichen zum Erliegen gekommen ist.

Dieser Problemtyp ist gut geeignet für die parallele Verarbeitung, da verschiedene Knoten im Cluster unabhängig voneinander an Teilmengen der 7,8 Millionen Datenpunkte arbeiten können. In jeder Iteration berechnen die Sklaven-Knoten die Entfernungen der Datenpunkte zu den jeweiligen Mittelpunktskandidaten und liefern an den Chef eine Liste zurück, die zu jedem bearbeiteten Datenpunkt den nächstgelegenen Kandidaten benennt. Der Chef berechnet daraus die Schwerpunkte der neuen vorläufigen Ökoregionen und schickt sie den Sklaven für die nächste Runde ihrer Berechnungen zurück.

Auch die Anfangspositionen der Kandidaten lassen sich durch parallele Berechnungen effizient bestimmen. Nach einem von uns erdachten Algorithmus bestimmen die Knoten im Stone SouperComputer kollektiv, welche Punkte in den extremsten Außenseiterpositionen liegen. Diese werden dann als Anfangswerte für die Kandidaten gewählt. Wenn das Iterationsverfahren mit derart gut verstreuten Datenpunkten beginnt, kommt es in weniger Schritten zum Ziel.

Das Ergebnis unserer Arbeit ist eine Reihe von Landkarten, die jede Ökoregion in einer anderen Farbe zeigen, von einer sehr groben Einteilung in nur vier Ökoregionen (Bild *B* im Kasten unten), die immerhin so großräumige Strukturen wie die Rocky Mountains und den wüstenartigen Südwesten erkennen lässt, bis zu einem Flickenteppich aus 5000 Ökoregionen (Bild *C*), der weitaus differenzierter ist als alle vorhergehenden Klassifikationen der Umweltbedingungen des Landes. Ihrer Unübersichtlichkeit zum Trotz ist die Detailkarte für die Wissenschaft äußerst wertvoll, denn es gibt viele bedrohte Pflanzen und Tiere, die nur in einer oder zwei der so ▶

Gruppen heißen Cluster und das Verfahren Clusteranalyse; diesmal sind es also nicht Computer, sondern Regionen, die zu Haufen (*clusters*) gruppiert werden. Im Beispiel sind es vier Gruppen, die immerhin eine grobe Einteilung der USA in Ökoregionen liefern (*B*). Eine Unterteilung in 5000 Ökoregionen bietet deutlich mehr Details (*C*). Ein anderes Verfahren extrahiert aus den ursprünglichen Merkmalen neue, zusammengesetzte, die möglichst viel von der Gesamtvariation der Merkmale bereits erfassen. So ist die „physiografische Position“ eine Mischung der ursprünglichen Variablen Höhe über dem Meeresspiegel, Sonneneinstrahlung und – in geringerem Maße – weiterer Variablen. Stellt man deren Werte in der Detailkarte durch verschiedene Intensitäten von Rot, Grün und Blau dar, werden über die Details hinaus wieder großräumige Strukturen erkennbar (*D*).



ÖKOREGIONEN-KARTEN MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER OAK RIDGE NATIONALLABORATORIEN; GRAFIKEN: SAMUEL VELASCO

Linux-Cluster in der Automobilindustrie

Was als Wissenschaftler-Unternehmung mit stark spielerischer Komponente begann, ist inzwischen zum Arbeitspferd für die Industrie herangereift

Von Tobias Feifel und Daniel Kobras

Moderne Automobilentwicklung benötigt enorme Rechenleistung. Immer mehr Tests und Optimierungsschritte finden heute nicht mehr an realen Modellen, sondern im Computer statt. Neben traditionellen Bereichen wie dem Computer Aided Design (CAD) oder der Strukturanalyse betreiben die Ingenieure am Computer inzwischen auch die Simulation komplexer Prozesse wie der Einspritzvorgänge im Motor.

Wegen des hohen Rechenbedarfs gehörten deshalb lange Zeit Großrechner mit den Ausmaßen eines Kleiderschranks zur Standardausstattung. Die Schränke gibt es immer noch, aber in ihnen steckt nicht mehr nur hochgezüchtete Spezialhardware, sondern Dutzende vernetzter PCs – ein bisschen edler verarbeitet vielleicht als das Sonderangebot im Supermarkt, im Grunde aber doch Alltagsware. Spätestens seit einem halben Jahr sind diese Linux-Cluster vom Versuchsballon zum neuen Trend in der deutschen Automobilindustrie aufgestiegen.

Ein typischer solcher Linux-Cluster steht beispielsweise in einer der Entwicklungsabteilungen von Audi (Bild unten): Dieser Schrank enthält 16 einzelne Rechner, die „Knoten“, mit 933 Megahertz schnellen Pentium-III-Prozessoren und je einem Gigabyte Hauptspeicher. Anders als im Durchschnitts-PC verrichten hier pro Computer jedoch nicht ein, sondern zwei Prozessoren ihre Arbeit.

Auch die Netzwerkverbindung von Linux-Clustern unterscheidet sich vom Fast Ethernet einer typischen Büroumgebung. Je nach Programm müssen pro Sekunde ein Gigabit und mehr an Berechnungsergebnissen von Knoten zu Knoten übertragen werden. Dadurch wird die Transportkapazität („Bandbreite“) des Netzwerks zum geschwindigkeitsbegrenzenden Faktor. In anderen Fällen kommt es nicht auf die Menge der zu übertragenden Informationen, sondern auf die Häufigkeit der Austauschakte an. Hier bestimmt vor allem die Latenz des Netzes – der Zeitverzug bis zur Übertragung des ersten Bits –, wie effizient ein Cluster das Problem verarbeitet. Eigens für diese Anforderungen sind Hochleistungsnetze wie Myrinet oder ein Scalable Coherent Interconnect (SCI) entwickelt worden und kommen zum Einsatz. Diese Spezialhardware arbeitet bis zu 10 000-mal so schnell wie ein Standard-Ethernet.



Ein kommerzieller PC-Cluster passt in einen fünftürigen Schrank.

Die Audi-Ingenieure testen mit ihrem Cluster die elektromagnetische Verträglichkeit neuer Konstruktionen. So verifizieren sie, dass ein klingelndes Mobiltelefon nicht versehentlich den Airbag auslöst, oder sie berechnen, wie der Kabelbaum im Fahrzeug verlegt werden muss, damit keine Störungen auftreten. Linux-Cluster in anderen Entwicklungsabteilungen simulieren beispielsweise Kollisionen (Bild rechts oben) oder die Bruchfestigkeit von Benzintanks.

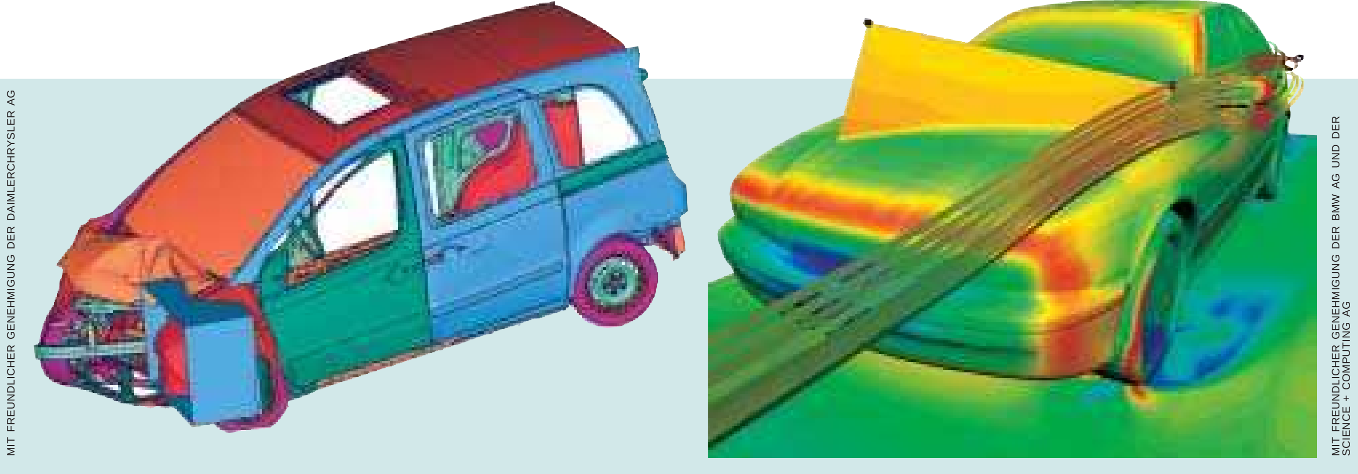
Die virtuelle Entwicklung ist erheblich kostengünstiger als Tests an realen Objekten, da weniger Prototypen angefertigt werden müssen. Die Computersimulation gibt dem Ingenieur außerdem detailliertere Auskünfte zu physikalischen Fragen: Im echten Windkanal kann er nur an wenigen Stellen Messgeräte anbringen. Virtuell hingegen lässt sich die Detektordichte beliebig steigern. Einzige Beschränkung ist die verfügbare Rechenleistung.

Ein typischer Linux-Cluster ist nicht schneller als ein Supercomputer, aber deutlich billiger: weniger als ein Viertel des Preises bei gleicher Leistung. War die immense Rechengeschwindigkeit bislang nur für große Rechenzentren finanzierbar, können inzwischen auch einzelne Abteilungen einen Cluster ihr Eigen nennen. Neben dem Kosteneffekt ergibt sich daraus auch eine höhere Verfügbarkeit von Rechenleistung für die Ingenieure vor Ort.

Die zunehmende Popularität der Linux-Cluster hat viele Ursachen. Vor allem die Computerspiele-Industrie hat die PC-Hersteller in den vergangenen Jahren zu permanenten Verbesserungen getrieben. Das Ergebnis war kostengünstige Massenware mit so hoher Leistung, dass sie inzwischen professionellen Ansprüchen genügt. Gleichzeitig hat die Entwicklergemeinde das Betriebssystem Linux deutlich stabilisieren können. Damit steht eine Berech-

identifizierten Ökoregionen überhaupt vorkommen.

In unseren ersten Landkarten hatten wir die Ökoregionen noch per Zufall eingefärbt; später konnten wir die Farben so zuweisen, dass sie die Ähnlichkeit der entsprechenden Ökoregionen widerspiegeln. Wir kombinierten neun der Umweltvariablen mit statistischen Hilfsmitteln zu drei zusammengesetzten Merkmalen, deren Werte wir auf der Landkarte durch entsprechende Intensitäten von Rot, Grün und Blau wiedergaben. Derart erzeugte Landkarten zeigen dann Abstufungen der Farben anstelle von scharfen Grenzen: Der Südosten mit seiner üppigen Vegetation ist vorwiegend grün, der kalte Nordosten blau



Ein mit dem Softwaresystem LS-DYNA simulierter Mercedes Vaneo prallt mit der linken Hälfte auf ein Hindernis (*off-set crash*; links). Luft umströmt in der Simulation mit dem System PowerVIZ die Außenhaut eines BMW-Modells (rechts).

nungsinfrastruktur mit hoher Zuverlässigkeit und geringem Wartungsaufwand zur Verfügung – beides unabdingbare Voraussetzungen für den professionellen Einsatz. Die nahe Verwandtschaft von Linux zu Unix, das die professionellen Anwender seit langem aus ihren Rechnernetzen kennen, erleichtert ihnen den Übergang auf die PC-Cluster und macht es überdies den Software-Herstellern einfach, etablierte Produkte auf Linux anzupassen. Inzwischen ernährt der Cluster-Boom sich nahezu selbst: Je mehr Automobilhersteller Linux-Cluster einsetzen, desto mehr Standardsoftware gibt es und umgekehrt.

Weit mehr als konventionelle Großrechner lassen sich Linux-Cluster individuell anpassen. Prozessorleistung, Speicherausbau und Netzwerktyp sind in weiten Grenzen variabel. Während an Universitäten gerne ausgiebig am Clusteraufbau gefeilt wird – nicht zufällig ist der Cluster-Urahn Beowulf an einem Forschungsinstitut entstanden –, tendieren Firmen zu Komplettlösungen etablierter Anbieter. Seit große Hardware-Hersteller wie etwa Fujitsu-Siemens und IBM Linux zur strategischen Plattform erkoren haben, ist das Betriebssystem für die Automobilbauer salonfähig geworden.

Bei so viel Auswahl gibt es erheblichen Beratungsbedarf. Planen und Einrichten („Konfiguration“) eines Clusters sind so aufwendig, dass sie derzeit den größten Hemmschuh für den Linux-Einsatz im professionellen Bereich darstellen. Hier finden Dienstleister wie science + computing ag ein Beschäftigungsfeld und ersparen es den Anwendern, sich das Know-how im eigenen Hause zuzulegen.

Allein im zweiten Halbjahr 2001 haben deutsche Entwicklungsabteilungen mindestens zwanzig neue Linux-Cluster mit zusammen über tausend Prozessoren in Dienst gestellt. DaimlerChrysler hatte Ende 1999 den Anfang gemacht mit einer ersten Installation aus 16 doppelten Pentium-III-Systemen zur Berechnung elektromagnetischer Verträglichkeitssimulationen. Die meisten Systeme rechnen inzwischen jedoch an Problemen der Kollisions-(Crash-)Analyse und Strömungsdynamik (Bild oben). Mit typischerweise mehr als hundert Knoten gehören die Crash-Cluster auch zu den umfangreichsten Systemen. In anderen Abteilungen sind meist nur 32 bis 64 Rechner zusammengeschaltet.

Linux-Cluster werden die herkömmlichen Spezialrechner nicht verdrängen, sondern vor allem ergänzen. So gibt es eine Reihe von Problemen, für die Spezialhardware deutlich besser geeignet ist: Berechnungen, bei denen die Kommunikations-Latenz eine kritische Größe ist, werden auf Rechnern, bei denen alle Prozessoren auf einen gemeinsamen Arbeitsspeicher (*shared memory*) zugreifen, oder sogar Einzelprozessoren schneller erledigt. So sind in bestimmten Crash-Simulationen Berechnungen mit sehr kurzen Zeitschritten gefordert. Wenn dann in jedem einzelnen Zeitschritt nicht viel zu berechnen ist, steht die Zeit, die für die Kommunikation benötigt wird, in keinem Verhältnis zur eigentlichen Rechendauer des Zeitschritts. Parallelisierung ist auch dann unzweckmäßig bis unmöglich, wenn die Einzelelemente („finiten Elemente“), in die eine Struktur zu Berechnungszwecken aufgelöst wird, mit sehr vielen ihresgleichen eng verknüpft sind und deshalb eine Zustandsänderung in einem Element sich auf sehr viele andere auswirkt. Schließlich sind manche Lösungsalgorithmen bislang schlicht nicht für parallelisierte Berechnung programmiert worden.

Der Boom der Linux-Cluster wird dennoch anhalten. Die Vorstände der Automobilhersteller haben mittlerweile Gefallen gefunden an der Vision der komplett virtuellen Fahrzeugentwicklung. Das bedeutet, dass sich die Simulation in ganz neue Felder wie zum Beispiel die Motorinnenraumdurchströmung oder die Lärmentwicklung ausdehnen wird. Einzelne Simulationsverfahren werden gekoppelt, um immer verlässlichere Resultate zu liefern: So werden zum Beispiel die Simulationen von Strömungen und Temperaturverteilung kombiniert, um das Fahrzeuginnere optimal zu klimatisieren. Zudem werden die herkömmlichen Methoden durch neue Verfahren ergänzt, um die Realität genauer abzubilden. So untersucht die stochastische Simulation die Sicherheit und Stabilität des Fahrzeugs und berücksichtigt dabei auch kleine Schwankungen wie beispielsweise Fertigungstoleranzen von Bauteilen. Linux-Cluster machen die immense Rechenleistung, die für all diese Aufgaben nötig ist, überhaupt erst bezahlbar.

Tobias Feifel *arbeitet bei der Dienstleistungsfirma science + computing ag in Tübingen. Das Unternehmen kümmert sich um die optimale Gestaltung von Rechnernetzen in Entwicklung und Forschung und ist Vorreiter im kommerziellen Einsatz von Linux-Clustern.*
Daniel Kobras *ist Diplom-Physiker und freier Journalist. Als Systemadministrator am Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität Tübingen ist er momentan selbst an der Installation eines Clusters beteiligt.*

und der trockene Westen rot (Bild *D* im Kasten 92/93).

Darüber hinaus konnte der Stone SouperComputer in allen Einzelheiten zeigen, wie sich die Ökoregionen der USA durch die globale Erwärmung verschieben würden. Unter Verwendung von ausgearbeiteten Klimaszenarien zweier anderer Forschergruppen erstellten wir Ökoregionen-Kartierungen für das Jahr 2099. Unter der Voraussetzung, dass diese Szenarien eintreten, können wir das Klima einzelner Regionen detailliert vorhersagen. So wird etwa Minneapolis (Minnesota), das heute klimatisch etwa Moskau vergleichbar ist, in einem Jahrhundert ungefähr so feuchtwarm sein wie heute St. Louis (Missouri).



Mit diesem Cluster aus 560 Mikroprozessoren vom Typ Pentium III berechnen Forscher am American Museum of Natural History in New York Probleme aus der Evolution und der Sternentstehung.

Man pflegt die Leistung eines Supercomputers daran zu messen, wie schnell er ein gegebenes Standard-Problem (ein „Benchmark“-Problem) löst. Uns als Wissenschaftlern kam es allerdings weit mehr auf die Leistungsfähigkeit bei unseren speziellen Problemen an. Um unseren Stone SouperComputer zu bewerten, haben wir unser Kartierungsproblem zum Vergleich auf einem Supercomputer des ORNL laufen lassen, kurz bevor dieser ausgemustert wurde. Diese Maschine, ein Intel Paragon mit 150 Gigaflops theoretischer Spitzenleistung, war immerhin einmal die schnellste im ORNL gewesen. Die Rechengeschwindigkeit je Prozessor war auf der Paragon vergleichbar mit der auf dem Stone SouperComputer.

Wir haben unseren Cluster zwar nie offiziell vermessen (wir wollten dafür ungern CPU-Zyklen von den wichtigen Arbeiten wegnehmen), aber das System hat eine theoretische Spitzenleistung von 1,2 Gigaflops. Genialität im Design paralleler Algorithmen ist wichtiger als nackte Geschwindigkeit oder Größe: In dieser jungen Wissenschaft kann David (beziehungsweise Beowulf) noch mit Goliath (Grendel) mithalten.

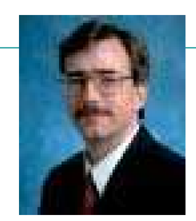
Seit unserem Stone SouperComputer hat sich der Trend zu Gunsten des Beowulf-Konzepts beschleunigt. Neue Cluster bieten immer höhere Geschwindigkeit zu immer niedrigeren Kosten. Ihre Namen sind unter anderem der mittelalterlichen Sagenwelt entlehnt: Grendel, Naegling, Megalon, Brahma, Avalon, Medusa and theHive, um nur einige wenige zu nennen.

Im November 2001 standen 43 Cluster aus PCs, Workstations oder anderen Servern auf der Liste der 500 schnellsten Computer der Welt. Die Plätze 2 und 6 auf der Liste werden von Clustern eingenommen: Ein Verbund aus 3024 Alpha-Servern von Compaq am Pittsburgh Supercomputing Center und einer von 1536 Stück am Nationallaboratorium in Los Alamos liefern reichlich 4000 bzw. 2000 Gigaflops an theoretischer Maximalleistung. Sechs Systeme auf der Liste tragen die Herstellerbezeichnung „self-made“, darunter ein Cluster an der TU Chemnitz (Platz 137) und einer an der Universität Tübingen (Platz 495).

Beowulf-Systeme dringen auch in die Industrie ein. Die großen Computerhersteller verkaufen Cluster an Firmen mit großem Bedarf an Rechenleistung. Zum Beispiel baut IBM einen Cluster aus 1250 Servern für NuTec Sciences, eine Biotechnologie-Firma, die mit diesem System krankheitsverursachende Gene identifizieren will.

Eine weitere Variante des Cluster-Prinzips ist verteiltes Rechnen auf vielen weit verstreuten Computern. Projekte wie SETI@home (Search for Extraterrestrial Intelligence) verschicken größere Pakete an Berechnungsaufgaben über das Internet an mehr als drei Millionen PCs, die diese Signaldaten in ihrer Leerlaufzeit bearbeiten (Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 109, und 2/2002, S. 111). Einige Experten in der Computerindustrie sagen für die Zukunft ein „Rechennetz“ (*computational grid*) voraus, das ähnlich funktionieren soll wie das Stromnetz (*power grid*): Rechenleistung kommt wie der Strom aus der Steckdose. Auf kommerzieller Ebene sind die ersten Großhandelsorganisationen für Rechenleistung (*grid computing*) im Aufbau.

Wir messen unserem Konzept auch erhebliche gesellschaftliche Bedeutung bei. Beowulf entwindet das Hochleistungsrechnen den Händen der wenigen Privilegierten und bietet preisgünstige Parallelrechner für das Volk. Forschergruppen, Hochschulen, Schulen und kleine Betriebe können ihren eigenen Cluster bauen oder kaufen – das eröffnet die Aussicht auf einen Supercomputer in jedem Hobbykeller. Sollten auch Sie den Bau eines eigenen Clusters planen oder schon durchführen, nehmen Sie bitte über unsere Web-Seiten (http://extremelinux.esd.ornl.gov/) Verbindung mit uns auf und erzählen Sie uns über Ihre Erfahrungen. Wir haben festgestellt, dass die Steinsuppe wirklich sehr herzhaft ist.







William W. Hargrove *(links),* **Forrest M. Hoffman** *(Mitte) und* **Thomas Sterling** *sind Pioniere des Beowulf-Rechnens. Hargrove arbeitet in der Abteilung für Computational Physics and Engineering am Oak Ridge National Laboratory (ORNL) in Tennessee; er ist ein Landschafts-Ökologe mit großen Problemen und zu vielen Daten. Hoffman, ein Computerspezialist in der Abteilung Environmental Sciences am ORNL, baut in seiner Freizeit Supercomputer im eigenen Keller. Sterling, der während seiner Zeit am Goddard-Raumflugzentrum der Nasa den ersten Beowulf-Cluster baute, arbeitet am Center for Advanced Computing Research des California Institute of Technology in Pasadena und ist zugleich Chef-Wissenschaftler am Jet Propulsion Laboratory.*

ARCHÄOLOGIE

Die Hethiter – eine antike Großmacht wird rekonstruiert

Nach ihrem Untergang vor über 3000 Jahren geriet die altorientalische Kultur der Hethiter völlig in Vergessenheit. Dabei hatte dieses Volk ein Großreich aufgebaut, das selbst dem mächtigen Ägypten Paroli bot.

Von Matthias Mochner

Um das Jahr 2000 v. Chr. trat ein neues Volk aus dem Dunkel der Geschichte: die Hethiter. Über das kaukasisch-armenische Gebirgsland ziehend wanderten indoeuropäische Volksgruppen westwärts nach Kleinasien ein. Im Hochland von Kappadokien wurden sie sesshaft und vermischten sich mit der hier seit dem 3. vorchristlichen Jahrtausend beheimateten anatolischen Urbevölkerung, den Hattiern.

Über die Geschichte der frühen hethitischen Bevölkerung bis etwa um 1650 v. Chr. ist wenig bekannt. Einzelne Territorialfürsten stritten um die Alleinherrschaft. In einem langwierigen Prozess, der bis 1380 v. Chr. währte, bildete sich schließlich ein Großreich heraus. An dessen Spitze standen der Großkönig, dessen Würde durch Erbfolge weitergegeben wurde, und ihm gleichberechtigt die Großkönigin. Der Staat galt den Hethitern als „Körper des Königs“ und wurde aus der königlichen Familie gebildet. Seinem Wesen nach war der Staat der Hethiter folglich kein Volksstaat, sondern eine Körperschaft. In dieser befand sich der Großkönig in unmittelbarem Kontakt zur Welt der Götter, die den Menschen nährten, aber auch straften.

Die Chronologie und Geschichte des Alten Hethiterreiches und auch die des darauf folgenden Neuen Reiches (1380–1200 v. Chr.) weist noch viele Lücken auf. Die Auswertung der hethitischen Schriftquellen gleicht einer Sisyphusarbeit. Allein in der Königsstadt Hattusa wurden seit Beginn der Grabungen durch das Deutsche Archäologische Institut im Jahre 1906 über 30 000 Tontafeln gefunden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Texte – geschrieben in der von den Babyloniern übernommenen Keilschrift – oftmals nur fragmentarisch erhalten sind, und dass die Hethiter insgesamt acht verschiedene Sprachen benutzten. Bislang ist etwa ein Drittel dieses hethitischen „Staatsarchivs“ entziffert. Die Mehrzahl der Keilschrifttexte thematisiert in auffälliger Weise das Verhältnis zwischen König und Göttern. „Der König möge wohlauf sein … und sein Land möge diesseits das Meer und jenseits das Meer zur Grenze haben“ formuliert etwa ein alt-hethitisches Gebet.

In Anatolien trafen die Hethiter auf ein weites Netz assyrischer Handelsniederlassungen, die zur Ausbeutung der dortigen Gold- und Silbervorräte im 3. Jahrtausend v. Chr. errichtet worden waren. Unter diesen war Hattusa – rund 150 Kilometer östlich von Ankara bei der heutigen Siedlung Bogazköy gelegen – eine der bedeutendsten. Um 1700 v. Chr. zerstörte König Anitta von Kussara sowohl die 300 Meter erhöht am Südende eines Tales gelegene Burg als auch die Unterstadt des stark befestigten Ortes. Um anzuzeigen, dass Hattusa nie wieder besiedelt werden solle, ließ der König Unkraut über die Ruinen säen. So erzählt es der „Anitta-Text“, der Tatenbericht dieses regionalen Hethiterfürsten.

Doch nur etwa hundert Jahre später wurde Hattusa zur Hauptstadt des Hethiterreiches. Als dessen Begründer gilt der ebenfalls aus Kussara stammende König Labarna (um 1600 v. Chr.). Sein Name wurde – wie der des „Caesar“ für die römischen Kaiser – Ehrentitel der Großkönige. Durch erfolgreiche Militäraktionen, kluge Diplomatie sowie die Fähigkeit, verschiedene Religionen zu assimilieren, gelang es den Feudalherrschern in sehr kurzer Zeit – insbesondere König



PETER OSZVALD, KUNST- UND AUSSTELLUNGSHALLE DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

Dieses von zwei Sphingen bewachte Tor in der Nähe des türkischen Dorfes Alacahöyük führt zu einem hethitischen Grabhügel.



T. C. KULTURMINISTERIUM; GENERALDIREKTION DER ANTIKEN UND MUSEEN, ANKARA

Der in Keilschrift abgefasste Vertrag von Kadesch – hier eine Kopie aus Gips – ist der älteste Staatsvertrag der Welt.

Schuppiluliuma I. (1380–1354 v. Chr.) – das Reich der Hethiter neben Ägypten und Babylonien als dritte Großmacht im alten Orient zu etablieren.

Als die Hethiter bis nach Syrien vordrangen, versuchten die Ägypter, ihnen Einhalt zu gebieten. Mit 40 000 Mann zog Pharao Ramses II. dem Heer des hethitischen Königs Muwatalli II. entgegen. Bei Kadesch (hethitisch: Kinza) kam es 1285 v. Chr. zur Schlacht, die mit der Niederlage der Ägypter endete. Da jedoch das Reich der Hethiter zu jener Zeit durch die Pest geschwächt war, nutzten diese ihren Vorteil nur teilweise: Ein Waffenstillstand wurde geschlossen, dann ein Friedensvertrag ausgehandelt, durch den Syrien hethitisch blieb. Es ist dies der älteste bekannte paritätische Staatsvertrag der Weltgeschichte. Als Symbol für den Weltfrieden ziert heute eine Kopie dieses hieroglyphisch und keilschriftlich überlieferten Vertrages das Verwaltungsgebäude der UNO in New York.

Doch nur etwa zwei Generationen nach seiner Blütezeit ging das Großreich der Hethiter im Sturm der so genannten „Seevölker“ zugrunde. Auch die Hauptstadt Hattusa, mit 168 Hektar Fläche eine der größten Stadtanlagen der altorientalischen Welt, wurde zerstört. Der Niedergang der Hethiter bleibt rätselhaft.

Merkwürdig ist auch, weshalb die Archäologen in Hattusa, das zu den am intensivsten erforschten Stätten der hethitischen Kultur gehört, bis heute keine Gold- oder Silberobjekte gefunden haben. Brachten die Hethiter ihren Staatsschatz rechtzeitig in Sicherheit? Gingen die Pretiosen verloren, oder wurden sie eingeschmolzen? Und wo bestatteten die Bewohner ihre Toten? Etwa 100 000 Grabstellen müssten es schon gewesen sein, so Jürgen Seeher, seit 1994 Grabungsleiter in Hattusa. Doch sein Team konnte bisher nur 1000 Gräber entdecken.

Für die Archäologen war es eine Sensation, als sie 1998 in Hattusa verkohltes Getreide fanden. Dessen Analyse wird vielleicht Hinweise auf das weit gehend unbekannte Alltagsleben der Hethiter liefern. Deutlicher lassen demgegenüber die Forschungen zu den drei Zeremonialtoren in der Stadtmauer erkennen, dass es sich bei der Oberstadt von Hattusa um eine ausschließlich sakrale Anlage gehandelt haben muss. Auf eine solche Funktion deuten über dreißig Tempel sowie eine Prozessionsstraße hin, die vom Königstor vor den Mauern entlang zum Sphinxtor und weiter über das Löwentor wieder zurück in die Stadt führt.

In der Unterstadt von Hattusa befand sich neben dem Königspalast das Tempelgebäude für die beiden Hauptgottheiten der Hethiter: für den Wettergott Hatti (Teschub) und für die Sonnengöttin Arinna (Chepa). Zwischen Ober- und Unterstadt wurden bei Nisantepe Felsreliefs mit über neunzig Darstellungen des hethitischen Götterkosmos gefunden. Hier in Felsspalten nachgewiesene ▶

DIE AUSSTELLUNG „Die Hethiter – Das Volk der 1000 Götter“ ist bis 9. Juni 2002 in der Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland in Bonn zu sehen. Öffnungszeiten: Dienstag und Mittwoch 10–21 Uhr, Donnerstag bis Sonntag 10–19 Uhr, Montag geschlossen.



Im 13. Jahrhundert v. Chr. erstreckte sich das Hethiterreich von Wilusa (dem antiken Troja) im Westen bis nach Mesopotamien und Nordsyrien.

Erd- und Brandbestattungen sind die frühesten in ganz Anatolien.

Auf Grund der innigen Beziehungen der Hethiter zu ihren Göttern liegt es nahe, die großartige Stadtanlage von Hattusa als symbolische Manifestation ihres Weltverständnisses zu begreifen. Dem Palastareal in der Unterstadt als Ort des irdischen Diesseits entspräche die obere Tempelstadt als dem göttlichen Jenseits. Die Kultanlage von Nisantepe wäre dann als Tor von der irdischen zur ewigen Welt aufzufassen. Die topografische Situation in Hattusa stützt jedenfalls, so Seeher, eine solche Überlegung.

Die Erforschung des „Volkes der 1000 Götter“ ist in Bewegung. An vielen Orten in der Türkei graben die Archäologen, sodass neue Entdeckungen zu erwarten sind. Dabei verspricht sich die Wissenschaft viel von der Geoprospektion und der Luftbildarchäologie. Insgesamt fünf künstliche Teiche wurden so in den zwei vergangenen Jahren in Hattusa entdeckt. Und bei der Stadtviertelforschung wurden entscheidende Fortschritte erzielt. Auch hofft man die Hieroglyphenschrift der Hethiter, die nur im Kult Verwendung fand, ganz zu entschlüsseln. Und vielleicht gelingt es ja sogar, das Rätsel um den hethitischen Staatsschatz zu lüften. ■

__Matthias Mochner__ arbeitet als freier Journalist und Museumsführer in Berlin.

MAINAUER GESPRÄCHE

Umweltpolitik – eine Sache von gestern?

Dieser Frage gingen Persönlichkeiten aus Kultur, Wissenschaft und Wirtschaft auf der Bodenseeinsel Mainau nach.

Von Claus M. Schmidt

Was ist geschehen? Die Weltmeister im Mülltrennen, die Erfinder des Grünen Punktes, die Nation, die von der Grünen Partei mitregiert wird – ausgerechnet die Deutschen interessieren sich nicht mehr für die Umwelt. Andere Themen wie Arbeit, Frieden, Gesundheit oder auch Freizeit gehen vor. Sozialforscher registrieren ein zunehmendes Desinteresse der Bundesbürger an Umweltfragen.

Das war nicht immer so. Noch im Jahr 1989 stand die Sorge um die Umwelt auf Platz 1 der Prioritäten. Aber „heute rangiert sie irgendwo unter ferner liefen“, bestätigt Peter Preisendörfer vom Institut für Soziologie der Universität Rostock den Trend.

Angesichts der drastisch veränderten Werteskala, die – spätestens seit dem 11. September 2001 – derzeit vom Thema Sicherheit angeführt wird, lud der Kreis der „Mainauer Gespräche“ zur Diskussion der Frage ein: „Umweltpolitik – eine Sache von gestern?“

Gestern, das waren die mächtigen Protestbewegungen der siebziger Jahre gegen Kernkraftwerke und gegen die Startbahn West. In den achtziger Jahren machte Greenpeace mit Schlauchbooten Jagd auf Walfänger und Dünnsäureverklapper. Aus den Protestbewegungen ging die Partei der Grünen hervor. Saurer Regen und Waldsterben beherrschten die Medien – bis zur Zäsur im Frühjahr 1986: Tschernobyl. Die öffentliche Sorge um die Umwelt, besonders aber um die Sicherheit von Kernkraftwerken führte dazu, dass am 6. Juni 1986 für Umweltschutz und Reaktorsicherheit ein eigenes Ministerium eingerichtet wurde. Drei Jahre später registrierten Meinungsforscher den Höhepunkt des öffentlichen Interesses an Umweltfragen.

Von da an ging es stetig bergab. Heute, so erklärte Peter Graf Kielmannsegg, Politikwissenschaftler an der Universität Mannheim, in seiner Eröffnungsrede der „Mainauer Gespräche“ auf der Blumeninsel im Bodensee, habe das Thema Umwelt im öffentlichen Interesse und auf der politischen Agenda erheblich an Bedeutung verloren. Keine Frage: Die Institutionalisierung der ökologischen Bewegung in Parteien und Ministerien hat wesentlich zur allgemeinen Beruhigung beigetragen. Zudem sind an mancherlei Orten Umweltbelastungen effektiv eingedämmt worden. Die Tage der schäumenden Flüsse sind vorbei, der Himmel über Bitterfeld und dem Ruhrgebiet ist so blau wie seit über hundert Jahren nicht mehr, die Mehrzahl der herkömmlichen offenen Müllhalden ist durch effiziente Recyclingmaßnahmen verschwunden, und das langfristige Aus für Kernkraftwerke ist beschlossen.

Die einst akuten Probleme unserer unmittelbaren Umwelt sind also weit gehend ausgeräumt. Ist das Thema Umwelt

damit zu Recht „von gestern“? Vielleicht als Thema, nicht aber als Aufgabe, die es zu bewältigen gilt. Die Naturvernichtung verläuft heute meist schleichend: So werden in Deutschland täglich 130 Hektar Boden versiegelt. Hinzu kommen die gravierenden Probleme des Fernbereichs, die sich unserer unmittelbaren und raschen Einwirkungsmöglichkeit entziehen wie etwa beim Klimaschutz. Hier stoßen die Handlungsmöglichkeiten von Nationalstaaten an ihre Grenzen. Typisch ist das Beispiel der USA: Bereits in den sechziger Jahren nahm die Politik dort die Luftreinhaltung sehr ernst, doch heute unterläuft sie die internationalen Bemühungen zum Klimaschutz. National scheint hier, wie im persönlichen Mikrokosmos, die „Low-cost-Strategie“ zu greifen. Schmerzgrenzen sind hier Kosten, die Regierungen von Wohlstandsdemokratien ihrer Wählerschaft nicht aufbürden wollen.

Umweltschutz ja – aber bitte ohne Aufwand

Wundert es da, dass sich die Verantwortung auf den eigenen überschaubaren Wirkungsraum beschränkt? Getreu dem Motto: Jeder kehre vor seiner eigenen Tür.

Fragt man Einstellungen ab, dann müsste uns um die Zukunft unserer Umwelt nicht bange sein. Das verbale Bekenntnis geht den Bundesbürgern sehr leicht von der Zunge, stellte Preisendörfers empirische Arbeit fest. Nun ließe sich aber grundsätzlich in Frage stellen, ob die Erhebung nach Mülltrennung und Verbrauch von Energie die entscheidenden Kernpunkte der Umweltproblematik sind. Doch valide sind die Antworten allemal, die Preisendörfer zur These zuspitzt: „Im persönlichen Umweltverhalten folgen Personen mit Umweltbewusstsein überwiegend einer Low-cost-Strategie.“ Ganz unakademisch: Für die Umwelt tun wir alles. Es darf freilich nichts kosten und keine Mühe bereiten!

Entscheidend ist der persönliche Aufwand. Mehr als kleine Umweltgefälligkeiten sind von real existierenden Bekenntnis-Ökologen nicht zu erwarten. Wenn der Glascontainer weiter weg ist, wandern Flaschen in den Hausmüll, und genauso geht es alten Zeitungen, wenn der Papiersammler nicht gleich unten im Hof steht. Eine „Schmerzgrenze“ ist schnell erreicht, wie sich besonders anhand der Debatte um Ökosteuern auf Benzin zeigt.

Wenig erstaunlich: Zwischen Bildung und Umweltbewusstsein besteht ein enger Zusammenhang, ähnlich wie zwischen Bildung und Einkommen. Erstaunen muss aber bei dem hohen ▶

Die Entdeckung der Nachhaltigkeit

„Es lässt sich keine dauerhafte Forstwirtschaft denken und erwarten, wenn die Holzabgabe aus den Wäldern nicht auf Nachhaltigkeit berechnet ist. Jede weise Forstdirektion muss daher die Waldungen des Staates ohne Zeitverlust taxieren lassen und sie zwar so hoch als möglich, doch so zu benutzen suchen, dass die Nachkommenschaft wenigstens ebenso viel Vorteil daraus ziehen kann, als sich die jetzt lebende Generation zueignet.“



GEORG-LUDWIG-HARTIG-STIFTUNG

Georg Ludwig Hartig

Aus: „Anweisung zur Taxation der Forste oder zur Bestimmung des Holzertrags der Wälder“, 1795. Von Georg Ludwig Hartig (1764–1837), Leiter der preußischen Staatsforstverwaltung

Stand an Umweltbewusstsein der Elite, dass diese ungleich mehr Ressourcen verbraucht als die weniger gebildeten Schlechterverdiener. Hier öffnet sich eine Schere: Wer mehr verdient, verbraucht mehr Rohstoffe und mehr Landschaft. Dabei hätten die führenden Köpfe in der besten aller Welten doch die Aufgabe, als Maßstab und Orientierung zu dienen. Doch als Vorbild taugen sie nicht. Weder im Mikro- noch im Makrokosmos. Der Verbrauch von Ressourcen ist offenbar eine lustbetonte Konstante, die sich nicht nach Plänen, Vorschriften, moralischer Verantwortung, sondern nach den vorhandenen Mitteln richtet.

Sind die Medien schuld? Müssten die nicht mehr Aufklärungsarbeit leisten? An dieser Stelle der Diskussion schimmern Gegensätze auf, die an die Fundi-Realo-Debatte der Grünen in den achtziger Jahren erinnert. Während Lutz Spandau, Geschäftsführer der Allianz Umweltstiftung, in den „Mainauer Gesprächen“ eine Bringschuld an die Medien anmahnte sowie eine zeitgemäße Öffentlichkeitsarbeit zur Wiederbelebung des Interesses forderte, übte sich Preisendörfer in Medienschelte: Unvorbereitet und oberflächlich seien Journalisten, Statements würden verkürzt wiedergegeben. So sei es fraglich, ob es überhaupt Sinn mache, sich mit den Medien zu befassen.

Das ist starker Tobak angesichts einer Gesprächsrunde, deren Plädoyer für mehr Aktivität im Umweltschutz von den geladenen Pressevertretern doch schließlich zu einer Breitenwirkung multipliziert werden soll. Das fand auch Wolfgang Röhrle vom Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg. Weil sein Ministerium auf Öffentlichkeit angewiesen ist, sponsert es eine regelmäßige Informationssendung auf dem regionalen Privat-Fernsehsender BTV, eine Art Werbung für einen schonenden Umgang mit der Umwelt.

Mit Umwelt kann man heute gar nicht mehr an die Öffentlichkeit gehen, meint hingegen Ludwig Karg, Vorstandsmitglied der B.A.U.M. AG. Sein Unternehmen vermeidet den Begriff „Umwelt“ einfach und kommuniziert statt dessen Fakten. Zum Beispiel, wie der Schadstoff XY industriell und in persönlichen Konsumentscheidungen konkret reduziert werden kann.

Wenig erstaunlich plädierte Josef Bugl als Vertreter der Industrie für eine Abkehr der staatlichen Aufsicht und Verordnungsschwemme zu Gunsten einer Selbstregulierung durch die Unternehmen. Eine Auffassung, die angesichts des Wettbewerbsdrucks im Markt und immer kürzerer Zyklen des Managements allerdings illusorisch scheint. Darauf wies Horst Mierheim als Vertreter des Umweltbundesamtes hin. So seien Entschwefelungsanlagen an den Schloten erst eingeführt worden, als entsprechende Vorschriften bestanden.

Vielleicht war das Thema zu breit angelegt, vielleicht waren die Standpunkte zu verschieden und zu sehr bezogen auf den jeweils eigenen Lebensbereich, zog Kielmannsegg am Ende das Fazit der Debatte. Bei aller Bekenntnis der Beteiligten für eine auch künftig lebenswerte Umwelt blieb doch beim Beobachter das mulmige Gefühl zurück, dass der alte Schwung der Bewegung dahin ist. Mit Bezug auf die ganztägig vorherrschende Wetterlage auf und rings um die paradiesische Insel Mainau schloss Kielmannsegg: „Rückblickend war es ein reiches und fruchtbares Gespräch, auch wenn sich der Nebel weder draußen noch bei der Diskussion ganz aufgelöst hat.“ Ja – schöner kann man es kaum sagen. ■

Claus M. Schmidt *ist Wissenschaftsjournalist in München.*

Wie die Umwelt in unseren Sprachschatz kam

Was unterscheidet eigentlich unsere Welt von unserer Um-Welt?

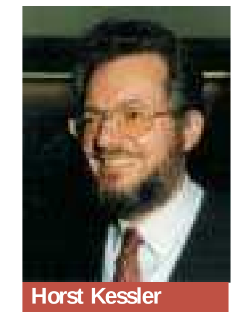
Das Wort „Umwelt“ ist seit 1800 im Gebrauch. Laut Herkunfts-Duden ist es ein Lehnwort aus dem Dänischen für „umgebendes Land“, „umgebende Welt“. In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde es als Ersatz für das bis dahin gebräuchliche französische „milieu“ üblich. Zum Fachbegriff wurde es durch den estländischen Biologen Jakob von Uexküll (1864–1944). In seinem Buch „Umwelt und Innenwelt der Tiere“ (1909) führte er die „Umwelt“ ein, um den Wahrnehmungsinhalt eines Organismus zu beschreiben: „Jede Umwelt bildet eine in sich geschlossene Einheit, die in all ihren Teilen durch die Bedeutung für das Subjekt beherrscht wird.“ Definition Umwelt: „Die auf einen Organismus einwirkende, unbelebte und belebte Umgebung, auf die er sich im Rahmen seiner ererbten Eigenschaften in Bau, Funktion und Verhalten anpasst.“

MAX-PLANCK-FORSCHUNGSPREIS

Von der Struktur zum Medikament

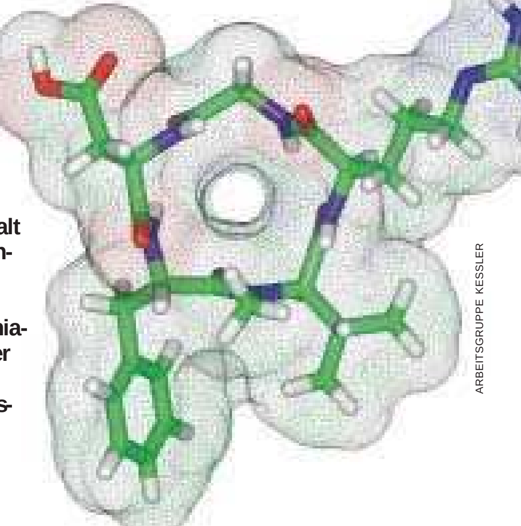
Der Chemiker Horst Kessler von der Technischen Universität München hat einen der mit 250 000 Mark dotierten „Max-Planck-Forschungspreise für internationale Kooperation“ 2001 erhalten. Dieser wurde gemeinsam von Max-Planck-Gesellschaft und Alexander von Humboldt-Stiftung an vier im Ausland und acht in Deutschland arbeitende Wissenschaftler aus sechs Disziplinen verliehen.

Das Preisgeld soll es den Ausgezeichneten ermöglichen, internationale Kooperationen aufzunehmen oder zu vertiefen, etwa in Form von Forschungsaufenthalten im Ausland. Damit hat Kessler reichlich Erfahrung; Gastprofessuren führten ihn in die USA, nach Kanada, Japan und Israel. Er erhält den Preis für seine herausragenden Beiträge zur Strukturaufklärung medizinisch bedeutsamer Makromoleküle mit Hilfe der NMR-Spektroskopie (*Nuclear Magnetic Resonance*, kernmagnetische Resonanz). Mit dieser beschäftigt er sich bereits seit seiner Habilitation Ende der 1960er Jahre, wobei er das Repertoire der NMR-Spektroskopie um eine Fülle neuer Techniken erweitern konnte.



Horst Kessler

Magnetfelder, erzeugt von den derzeit stärksten supraleitenden Magneten, spalten die einzelnen Spinzustände der Atomkerne energetisch auf. Die „Umgebung“ in Form der chemischen Struktur des Moleküls nimmt dabei subtilen Einfluss auf die aufgespaltenen Energieniveaus. Regt man diese Niveaus mit Radiostrahlung an, so unterscheiden sich die dafür nötigen Frequenzen auch bei gleichen Atomsorten je nach ihrer Lage im Molekül. Dabei können sich die Kernspins zusätzlich noch gegenseitig beeinflussen, vergleichbar einer angeschlagenen Klaviersaite, die weitere Saiten in Schwingung versetzt.



ARBEITSGRUPPE KESSLER

Mit Hilfe der NMR-Spektroskopie ermittelte Horst Kessler die räumliche Gestalt eines so genannten zyklischen Peptids. Dieser ringförmige Miniatur-Eiweißkörper ist in der Lage, Krebsgeschwülste „auszuhungern“.

Man erhält auf diese Weise gewissermaßen die Signatur der Molekülstruktur, aus der sich mit Computerhilfe seine Zusammensetzung und räumliche Gestalt berechnen lässt. Das ist besonders wichtig, um die Wirkung biologischer Makromoleküle zu verstehen, vor allem im Hinblick auf medizinische Anwendungen. Horst Kessler widmet sich deshalb mit seiner Arbeitsgruppe intensiv dem Design und der Strukturaufklärung neuer Wirkstoffe. So ist es ihm unter anderem gelungen, eine wirkungsvolle Substanz gegen Krebs zu finden, die Metastasen von der Blutversorgung abschneidet und gewissermaßen „aushungert“ (SdW 11/2000, S. 48). Sie wird bereits an einer kleinen Gruppe von Patienten mit fortgeschrittenem Krebs getestet.

MAX-BORN-PREIS

Kritische Phänomene in Filmen

Wenn ein Fremdkörper im Auge auf die Tränendrüse drückt, der Motor wie geschmiert läuft oder ein Rührei auf der Ölschicht in der Pfanne brutzelt, sind flüssige Filme auf festen Oberflächen im Spiel.

Zu beschreiben, wie sich solche Grenzflächen zwischen Flüssigkeiten und Festkörpern verhalten, gehört zum Arbeitsgebiet von Siegfried Dietrich. Der Physiker erhält den Max-Born-Preis 2002 für seine Beiträge zur Theorie der Benetzungsphänomene.

Der Preis erinnert an Max Born, einen der Pioniere der Quantenmechanik und Nobelpreisträger des Jahres 1954, der in den 1930er Jahren nach Großbritannien emigrierte und bis 1953 in Edinburgh lehrte. Der nicht teilbare Preis wird dabei abwechselnd an einen deutschen und einen britischen Physiker verliehen und gilt – auch wenn er nur mit 2000 Mark dotiert ist – als hochrangige Auszeichnung.

Dietrich war zehn Jahre Professor an der Bergischen Universität Wuppertal. Seit August 2000 hat er den Lehrstuhl für Theoretische Festkörperphysik an der Universität Stuttgart inne und ist Direktor am dortigen Max-Planck-Institut für Metallforschung.

Eine Flüssigkeit wird unter gewissen Umständen auf einer festen Oberfläche zu einem dünnen Film und benetzt den Festkörper. Die damit verbundenen Phänomene werden zwar bereits seit langem studiert, doch erst in neuester Zeit konnten Methoden entwickelt werden, die einen quantitativen Vergleich zwischen Messung und Theorie erlauben. Eine Frage dabei ist, welche „Phasenübergänge“ die Grenzschichten durchlaufen, wobei sie andere und völlig neue Eigenschaften aufweisen können als kompakte Materialien.

Mit den Mitteln der „Dichtefunktionaltheorie“ gelingt es Dietrich, die charakteristischen Größen solcher Grenzschichtstrukturen auf atomarem Maßstab zu berechnen. Besonders interessant sind dabei „kritische Punkte“, an denen sich Materie in einem eigentümlichen Zustand befindet: Lokale Störungen, etwa durch veränderten Druck an einem Ort, breiten sich dann viel weiter aus, als es die Reichweite der molekularen Wechselwirkungen erwarten ließe. Im Extremfall reagiert eine Probe als Ganzes auf kleinste Änderungen.

Siegfried Dietrich

Ein Anwendungsbeispiel, bei dem Grenzflächenphänomene eine zentrale Rolle spielen, ist das Verhalten von Flüssigkeiten auf so genannten chemischen Chips, mit denen etwa wertvolle biologische Materialien analysiert werden können. Anders als bei den Mikrochips der Halbleiterindustrie wird hier die Miniaturisierung nicht von Quantenfluktuationen begrenzt, sondern durch die Temperatur- und Druckschwankungen der Flüssigkeitsstrukturen.

Rechen-Therapie-Zentrum

Dyskalkulie – verloren in der Welt der Zahlen

Was ist 3 mal 19?“, fragt die Psychologin ein Kind, das immerhin in die sechste Klasse eines Gymnasiums geht. Die Antwort verblüfft: „37“. Die Erläuterung überrascht noch mehr: „3 mal 9 ist 27, und dann ist da noch eine 1, die kommt dazu.“ Angelika Schlotmann-Wagener, Gründerin und Geschäftsführerin des privatwirtschaftlichen Rechen-Therapie-Zentrums in Schriesheim bei Heidelberg, kennt solche Irrungen: „Dieses Kind hat die Logik des Dezimalsystems und die des Multiplizierens nicht verstanden. Es konnte seine Rechenschwäche bislang durch Auswendiglernen – 3 mal 9 gleich 27 – kompensieren. Im Allgemeinen fallen solche Kinder in der dritten bis fünften Klasse auf.“

Als Rechenschwäche, fachlich Dyskalkulie, bezeichnen Psychologen eine Einschränkung der Intelligenz im Verständnis für die Welt der Zahlen; sie ähnelt der bekannteren Lese-Rechtschreib-Schwäche, fachlich Legasthenie. Rechenschwache Kinder erreichen in standardisierten Intelligenztests im Schnitt einen IQ von 100, ihre Rechenleistung liegt mit einem Rechen-IQ von maximal 85 aber mindestens eine Standardabweichung darunter.

Für die Kinder hat ihre Teilleistungsschwäche fatale Konsequenzen. Da sie in der Welt der Zahlen nicht Fuß fassen, häufen sich Misserfolge in der Schule. Frustriert fürchten sie den Mathematikunterricht, halten sich überhaupt für dumm. Daraus resultieren oft seelische Belastungen und körperliche Beschwerden, manchen Kindern droht der Wechsel in eine Förderschule, gelegentlich beobachtet man aggressives Verhalten.

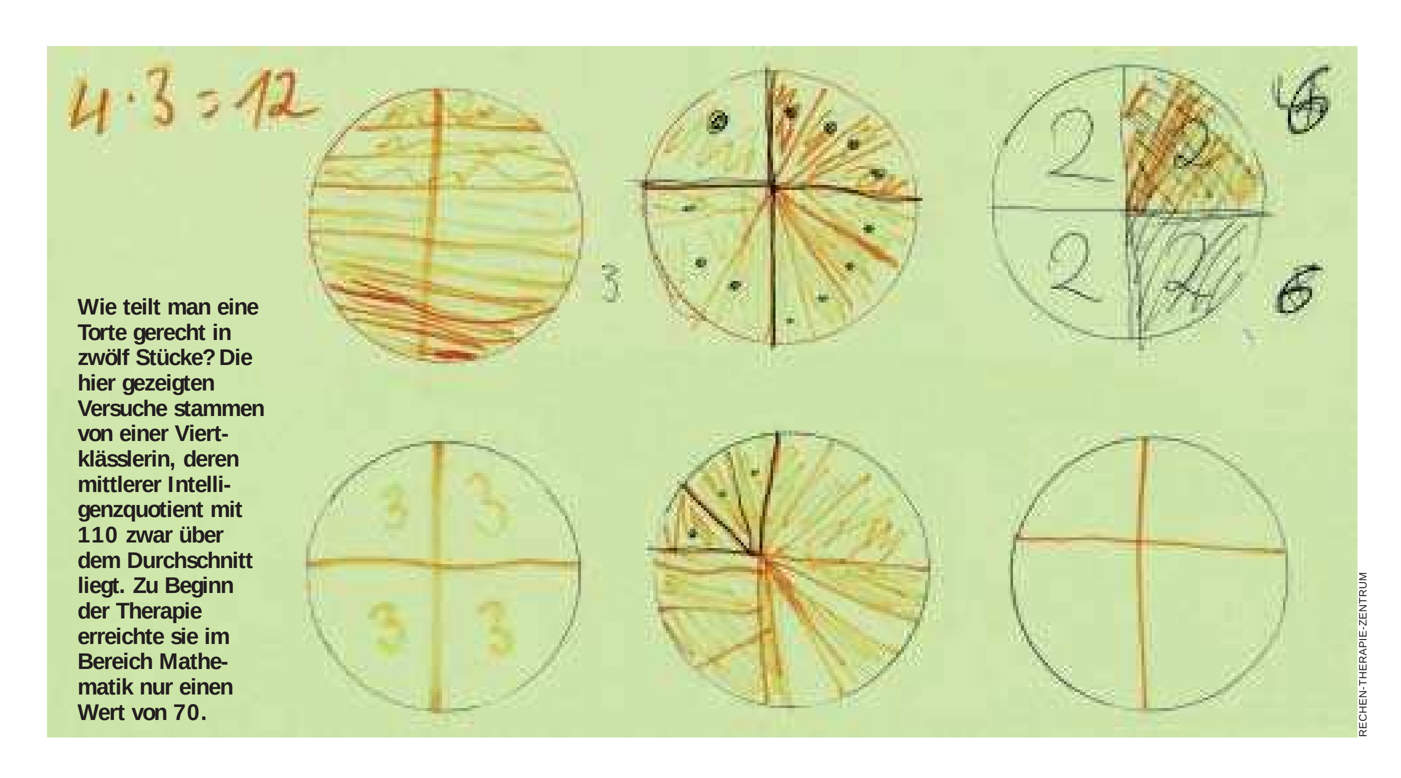
Situatives Lernen statt Frontalunterricht

Häufig bleibt die Dyskalkulie als Ursache der Probleme lange unentdeckt, denn standardisierte Tests erfassen leider vor allem die Rechentechnik, also das sture Anwenden von Regeln. Die viel wesentlichere Rechenlogik, also das Verstehen, wie eine konkrete Frage mathematisch übersetzt und gelöst wird, fällt durch das Raster. Technik lässt sich aber gut „pauken“. So kann ein rechenschwaches Kind, dessen Zahlenverständnis nicht über das Ordinalniveau hinausgeht, die Aufgabe „8 minus 5“ durch einfaches Rückwärtszählen lösen – häufig unter Zuhilfenahme der Finger. Bei komplizierteren Operationen und größeren Zahlen versagt diese Strategie bald.

Der Mangel an effektiven standardisierten Testverfahren mag ein Grund dafür sein, dass die Dyskalkulie von offizieller Seite nur zögerlich anerkannt wird. Immerhin erstatten die Jugendämter in Baden-Württemberg und Hessen seit 2000 die anfallenden Therapiekosten ganz oder zumindest anteilig.

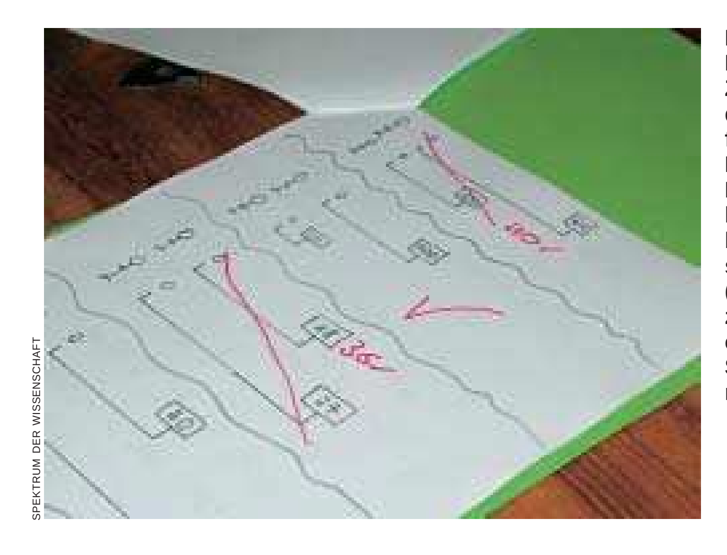
Noch fehlen spezielle Förderprogramme an den Schulen, und auch die Forschung nimmt sich des Themas nur sporadisch an. So kritisierten die Freiburger Pädagogen Hans-Dieter Gerster und Rita Schultz 1998 in ihrem Forschungsbericht „Schwierigkeiten beim Erwerb mathematischer Konzepte im Anfangsunterricht“, dass selbst erklärte Studien zur Dyskalkulie davon ausgingen, das Mathematiklernen sei ein „Erlernen von Regeln, wie mit Zahlen und Aufgaben umzugehen ist“.

Die in Graz geborene Angelika Schlotmann-Wagener kam mit dem Thema schon während des Psychologie-Studiums in Berührung. An der Universität Heidelberg untersuchte Schlotmann-Wagener später den Ablauf logischen Denkens, insbesondere des Planens von Handlungen basierend auf einem situativen Lernansatz, fachlich *situated cognition* genannt. 1999 entschloss sie sich, diese verschiedenen Erfahrungsbereiche zusammenzubringen, und gründete das



Wie teilt man eine Torte gerecht in zwölf Stücke? Die hier gezeigten Versuche stammen von einer Viertklässlerin, deren mittlerer Intelligenzquotient mit 110 zwar über dem Durchschnitt liegt. Zu Beginn der Therapie erreichte sie im Bereich Mathematik nur einen Wert von 70.

RECHEN-THERAPIE-ZENTRUM



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Psychologen des Rechen-Therapie-Zentrums prüfen das Verständnis für Relationen. Hier sollte ein Kind die Richtigkeit der Angaben beurteilen oder sie korrigieren (rot). Nur bei der zweiten Aufgabe erkannte es die Streckenverhältnisse korrekt.

Rechen-Therapie-Zentrum. Mittlerweile wurden dort etwa 150 Kinder nach den Grundsätzen der *situated cognition* behandelt, meist mit Erfolg.

Einen Schwerpunkt der Arbeit bildet die Entwicklung geeigneter Therapiematerialien und die Konstruktion eines geeigneten Testverfahrens zur Erfassung der Rechenlogik. „Kannst Du dieses Blatt Papier mit der Schere gerecht zwischen uns aufteilen?“ prüft beispielsweise, ob das Konzept der Teilung schon angelegt ist: Der Schritt über das Falten in zwei gleiche Hälften erscheint rechenschwachen Kindern nicht unbedingt selbstverständlich. Vergleiche von Strecken auf dem Zahlenstrahl geben Aufschluss über das Vermögen, Relationen zu erkennen (siehe Bild oben). Auch die mathematische Symbolsprache stellt oft eine Herausforderung für das rechenschwache Kind dar, besonders bei den Operatorzeichen oder beim Gleichheitszeichen. So legen die Psychologen des Zentrums den Kindern gern ein Blatt Papier vor mit der Formel „4 = 4“ und fragen: „Ist das richtig oder falsch?“ Dann kommt vielleicht die Antwort: „Ganz falsch, denn da kann man ja nichts rechnen.“ Ein solches Defizit wird dann gemäß dem situativen Ansatz spielerisch angegangen, beispielsweise mit einer Waage. Jeweils vier gleiche Objekte, beispielsweise Murmeln, auf beiden Seiten veranschaulichen die genannte Formel. Das Kind wird nun ermuntert zu formulieren, was es sieht. Der Therapeut hilft durch Feedback, die Äußerungen allmählich zu präzisieren und schließlich in die mathematische Sprache zu übersetzen. Es gibt kein Vormachen wie im herkömmlichen Frontalunterricht, nur Hilfen bei der Entwicklung eigener Lösungsstrategien.

„Es ist ganz wichtig, dass man den Bezug zur Alltagswirklichkeit immer aufzeigt“, erläutert Schlotmann-Wagener. „Deshalb wählen wir Beispiele wie das Aufteilen einer Torte beim Kindergeburtstag.“ Noch einen Schritt weiter geht das Projekt „Mathe-Live“: Eine Gruppe von drei bis fünf Kindern möglichst gleichen Leistungsstandes unternimmt mathematische Exkursionen ins Leben. Da wird dann beispielsweise überlegt, wie die Höhe des Schriesheimer Burgturms zu messen sei, da müssen die Kinder im Café mit ihrem Geld haushalten.

Die Eltern sollten die Therapie unterstützen. Deshalb gehören auch Elterntrainings zum Programm. Nach Möglichkeit kooperieren die Psychologen auch mit den Lehrern ihrer Klienten, doch das Verständnis für die Dyskalkulie ist dort teilweise noch dürftig entwickelt. „Die PISA-Studie wird einiges in Bewegung setzen“, glaubt die Psychologin. „Selbst normal Begabte verstehen und merken Selbsterlerntes besser als etwas nur Vorgeführtes. Dazu muss man aber auch Raum lassen, eigene Ideen zu entwickeln. Der bis ins Detail ausgearbeitete Frontalunterricht nach Lehrplan kann das nur schwer integrieren.“

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Das Unternehmen im Profil

Das Rechen-Therapie-Zentrum in Schriesheim bei Heidelberg existiert seit 1999. Mittlerweile sechs Psychologinnen und Psychologen führen diagnostische Untersuchungen durch und behandeln rechenschwache Kinder mit fundierten und effektiven Methoden. Das Einzugsgebiet des privaten Instituts reicht über den Rhein-Neckar-Kreis bis nach Frankfurt. Seit der Gründung wurden etwa 150 Kinder behandelt. Der Erfolg des Projektes „Mathe-Live“ veranlasste die Firmengründerin, ein weiteres Unternehmen, „non scholae ...“, ins Leben zu rufen: Es soll lernmüden Schülern die Möglichkeit geben, Wissen sowie Fertigkeiten durch praxisorientiertes Erfahrungslernen zu vernetzen.



AG. SCHAPOWALOW

Wie hoch ist dieser Turm? In Mathe-Live-Gruppen erkunden rechenschwache Kinder ihre Umwelt mittels Mathematik.

BIOLOGIE

Geoffrey F. Miller

Die sexuelle Evolution

Partnerwahl und die Entstehung des Geistes

Aus dem Englischen von Jorunn Wissmann.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2001.
576 Seiten, € 29,95



Alle Lebewesen sind an die ökologischen Gegebenheiten ihres speziellen Lebensraumes (Feinde eingeschlossen) durch gewisse genetisch festgelegte Merkmale angepasst. Durch Mutation entstehen genetische Varianten, die unterschiedliche Fortpflanzungsraten aufweisen. Das wiederum hat zur Folge, dass schließlich die am besten an die Umwelt angepassten Varianten vorherrschen; das nennt man natürliche Selektion.

Der englische Kognitionspsychologe Geoffrey F. Miller trägt nun überzeugend sein Argument vor, dass zum Entstehen vieler Merkmale von Tieren und Menschen die sexuelle Selektion eine viel wichtigere Rolle gespielt hat als die natürliche. Selbst bei einem ideal an den Lebensraum angepassten Individuum hängen die Fortpflanzungs-Chancen entscheidend davon ab, ob es einen Paarungspartner gewinnt. Die dafür unterschiedlich ausgerüsteten Mutanten unterliegen nun einer Selektion, die von gleich- und gegengeschlechtlichen Artgenossen ausgeht.

Da ein Männchen mehr Nachkommen haben kann als ein Weibchen, müssen Männchen um Gelegenheiten zur Paarung konkurrieren. Sie tun das, indem sie Rivalen bekämpfen und Weibchen umwerben. Für ihren Erfolg sind in beiden Fällen körperliche, physiologische und Verhaltens-Eigentümlichkeiten entscheidend, die mit Angepasstheit an den Lebensraum nichts zu tun haben und ihr – wie viele auffällige bis bizarre Körperauswüchse sowie Kampf- und Balzrituale – oft sogar entgegen wirken.

Gegen Rivalen entscheiden Größe, Kraft, Ausdauer und Verhaltenstaktiken, aber auch besondere Methoden der Spermienkonkurrenz im Körper des Weibchens, wenn dieses mit mehreren Männchen kopulierte. Um die Aufmerksamkeit und Paarungsbereitschaft des Weibchens zu erringen, kommt es auf verschiedenste weibliche Vorlieben an. Das Überangebot an Männchen erlaubt den Weibchen strenge Auswahlkriterien, die dann besonders effektiv sind, wenn sie sich auf genetische Eigenschaften des Männchens richten, die mit hoher Überlebenswahrscheinlichkeit der Nachkommen einhergehen. Es können beliebige Eigenschaften sein, wenn sie nur so kostspielig sind, dass allein Top-Männchen sie sich leisten können.

So viel erfährt der Leser, mit einigen Umwegen und ablenkenden Plaudereien, in den ersten fünf Kapiteln. Ab Kapitel 6 geht es um den Menschen. Und nun nehmen Vermutungen und hübsch gedachte Möglichkeiten überhand. Zwar heißt es immer wieder „eventuell", „vielleicht", „könnte" und „möglicherweise", es geht dann aber mit dem Fraglichen weiter, als sei es erwiesen. So wird das Sachbuch dann doch zur – durchaus intelligent und eindringlich geschriebenen – Unterhaltungslektüre. Und weil der Autor davon fasziniert ist, was alles am Menschen durch sexuelle Auswahl erklärbar sein könnte (Penis, Brüste, Taille, Gehirngröße, Kunst, Schmuck, Humor, Sprache, Verspieltheit, Kreativität), ist das Buch so ausschweifend dick geworden.

Der Epilog verheißt den Kognitionswissenschaften, dass „Wahrnehmung, Kategorisierung, Aufmerksamkeit, Gedächtnis, Schlussfolgerung und Kontrolle der Körperbewegungen sich möglicherweise alle unter einem gewissen Einfluss der sexuellen Auswahl entwickelt haben – oder auch nicht". Eben!

Wolfgang Wickler

Der Rezensent ist kommissarischer Leiter des Max-Planck-Instituts für Verhaltensphysiologie in Seewiesen.

ARCHÄOLOGIE

Rosalie David und Rick Archbold

Wenn Mumien erzählen

Neueste naturwissenschaftliche Methoden enträtseln das Alltagsleben im Ägypten der Pharaonen

Aus dem Englischen von Christian Quatmann.
Collection Rolf Heyne, München 2001. 191 Seiten, € 32,19

Ohne Zweifel ist das interessanteste neue Forschungsfeld (der Ägyptologie) die Paläopathologie, bei der die ausgeklügeltsten Verfahren der Medizin und der Biologie zum Einsatz kommen. Auf diese Weise gelingt es, immer neue Geheimnisse der uralten ägyptischen Mumien zu lüften. Als Initiatorin des Mumienprojektes von Manchester hatte ich das Glück, bei der Etablierung dieses neuen Forschungsfeldes eine entscheidende Rolle zu spielen." So beschreibt



Rosalie David präsentiert im Mumiendepot des Manchester Museum die sterblichen Überreste der Tempelmusikerin Asru (gestorben ungefähr 700 v. Chr.).

die britische Ägyptologin Rosalie David ihre Arbeit. Und ihr Buch ist tatsächlich eine überaus spannende Reise durch die Entwicklung einer vergleichsweise jungen Wissenschaftssparte.

Zwar hatte schon um 1900 der englische Anatom Sir Marc Armand Ruffer zahlreiche Mumien und Skelette in Ägypten erstmalig auf wissenschaftlichem Niveau untersucht. Dann aber verfiel die Paläopathologie, aus Mangel an technischen Untersuchungsmöglichkeiten und – infolgedessen – öffentlichem Interesse, für mehrere Jahrzehnte in einen Dornröschenschlaf, aus dem sie erst in den siebziger und achtziger Jahren wieder erwachte. Mehrere Mumienprojekte in den USA, Kanada und nicht zuletzt unter Rosalie Davids Leitung in Manchester haben zu ganz wesentlichen neuen Erkenntnissen über das Leben und Leiden der alten Ägypter geführt.

Neue technische Untersuchungsmethoden liefern eine Fülle zusätzlicher Informationen. Das Buch lässt den Leser die Spannung spüren, welche die Untersucher bei der ersten Anwendung von Computer-Tomografie und flexibler Endoskopie auf Mumien empfanden.

Im Lichte der neuen Erkenntnisse erscheint das Leben der alten Ägypter von allerlei Plagen beeinträchtigt. Abgeschliffene Zähne mit zahlreichen eitrigen Zahnabszessen, Befall durch Parasiten, alte Verletzungsfolgen und Abnutzung von Gelenken und der Wirbelsäule durch schwere körperliche Arbeit wurden sichtbar, und das, obwohl die Daten an insgesamt nur wenigen Dutzend Mumien erhoben werden konnten, die in europäischen und nordamerikanischen Museen und Universitätsinstituten ihrer wissenschaftlichen Untersuchung entgegenschlummerten. Die Untersuchung von Mumien und Mumienresten in Ägypten selbst könnte noch weit mehr zur Klärung offener Fragen beitragen, ein Aspekt, der in diesem ansonsten so brillanten Buch unberührt bleibt.

Rosalie David und der Wissenschaftsjournalist Rick Archbold machen in diesem Buch auch deutlich, dass die Fortentwicklung der Mumienforschung längst nicht abgeschlossen ist. Immer bessere Geräte zur nicht-invasiven Untersuchung von Mumien, wie Spiral-CT und hochauflösende bildgebende Verfahren, histologische und molekularbiologische Untersuchungen, vor allem von alter DNA aus Knochen und Mumiengewebe, lassen noch wesentlich mehr und detailliertere Informationen erwarten. So gesehen kann das vorliegende Buch nur einen „Zwischenbericht“ über die ersten rund hundert Jahre Mumienforschung geben. ▶

Neben einer Fülle von wissenschaftlichen Informationen – und einigen Anekdoten aus ihrer Arbeit – stellen Rosalie David und Rick Archbold in einführenden Kapiteln Bedeutung und Praxis der Mumifizierung im alten Ägypten ausführlich und umfassend dar. Dadurch gewinnt auch der Unkundige rasch Einblick in die Beweggründe und Hintergründe dieses für uns ungewohnten Umgangs mit Toten. In fiktiven Zwiegesprächen mit antiken Persönlichkeiten werden wichtige Einzelaspekte aufgegriffen und vertieft. Schließlich lebt dieses Buch nicht unerheblich von seiner hervorragenden und anschaulichen Bebilderung.

Insgesamt ein äußerst gelungenes und sehr lesenswertes Werk. Dass ihm in Zukunft weitere, wichtige Kapitel hinzuzufügen sein werden, kann heute seine Qualität nicht beeinträchtigen.

Andreas Nerlich

Der Rezensent ist Leiter des Instituts für Pathologie am Krankenhaus München-Bogenhausen, Professor für Pathologie und Leiter der interdisziplinären Arbeitsgruppe „Paläopathologie“, die sich intensiv mit ägyptischen Mumien beschäftigt.



INFORMATIK

Friedrich Naumann

Vom Abakus zum Internet

Die Geschichte der Informatik

Primus, Darmstadt 2001. 287 Seiten, € 29,90

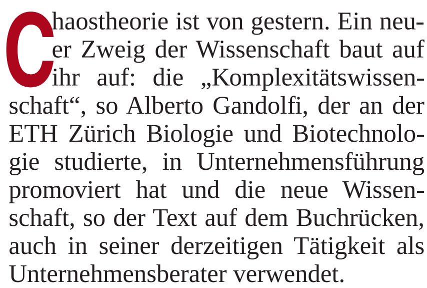
Der „Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe“ (RGW) der sozialistischen Länder unternahm in den siebziger Jahren eines „der größten Projekte in der bis dahin 20-jährigen Geschichte“: den Nachbau der Computerfamilien IBM/360 und 370, die im Original wegen der damals geltenden Exportrestriktionen kaum zu beschaffen waren. Den sozialistischen Originalton, in dem der Autor diese heroischen Bemühungen preist, habe ich schon lange nicht mehr gehört – und viele Einzelheiten gelernt, denn davon haben die Wessis damals nicht viel mitbekommen.

Von diesem einen Kapitel abgesehen, präsentiert Friedrich Naumann, der an der Bergakademie Freiberg studiert hat und seit 1993 Professor für Wissenschaftsgeschichte in Chemnitz ist, allerdings nur Dutzendware, und das in einer merkwürdig steifen Bürokratensprache. Abakus und andere mechanische Rechenhilfen müssen herhalten, den Beginn der Informatik in möglichst graue Vorzeiten zu verlegen. Klassische Elektrotechnik füllt viele Seiten – ja, ein Computer ist auch ein Elektrogerät und zählt den Telegrafen zu seinen entfernten Vorfahren. Nach 200 Seiten Vorgeschichte und Hardware kommen gerade noch 26 Seiten zu Software aller Art und 16 zum World Wide Web einschließlich der Vorläufer.

Das ist noch nicht „die“ Geschichte der Informatik.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



KOMPLEXITÄTSWISSENSCHAFT

Alberto Gandolfi

Von Menschen und Ameisen

Denken in komplexen Zusammenhängen

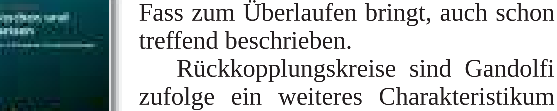
Aus dem Italienischen von Anna Maria Vietri.
Orell Füssli, Zürich 2001. 256 Seiten, € 29,50



Chaostheorie ist von gestern. Ein neuer Zweig der Wissenschaft baut auf ihr auf: die „Komplexitätswissenschaft“, so Alberto Gandolfi, der an der ETH Zürich Biologie und Biotechnologie studierte, in Unternehmensführung promoviert hat und die neue Wissenschaft, so der Text auf dem Buchrücken, auch in seiner derzeitigen Tätigkeit als Unternehmensberater verwendet.

Ein komplexes System setzt sich aus chaotischen Teilsystemen zusammen und entwickelt unter Beibehaltung ihrer typischen Eigenschaften etwas qualitativ Neues. Ein Beispiel für ein solches Teilsystem sind die inzwischen zum Klassiker der Chaostheorie gewordenen drei Gleichungen, mit denen der Meteorologe Edward Lorenz die Unsicherheit von Wetterprognosen demonstrierte (Spektrum der Wissenschaft 11/2001, S. 66). Sie bilden nur einen winzigen Teil des viel komplexeren Systems Erdatmosphäre. Da die Teilsysteme außerdem nicht in einfacher Weise, sondern netzartig miteinander verknüpft sind, erweisen sich komplexe Systeme als kaum manipulierbar. Fluktuationen können Bifurkationen (Verzweigungen) auslösen, das heißt den Übergang des Systems in einen qualitativ anderen Zustand (Bild Seite 109 oben).

Im physikalisch strengen Sinne sind nicht alle von Gandolfi erwähnten Beispiele echte Bifurkationen; manchmal handelt es sich um einfache Stabilitätsverluste. Da Gandolfi jedoch nicht nur physikalische Systeme behandelt, wäre eine großzügigere Definition akzeptabel. Nur: Ist all die Fachsimpelei nötig? Gandolfi beschreibt beispielsweise den Verlauf der Geschichte als eine Abfolge von eher stabilen Phasen und durch kleine Fluktuationen ausgelösten, plötzlichen Bifurkationen, in denen ein Einzelner eine Revolution auslösen konnte, weil das System an die Schwelle der Belastbarkeit geraten war. Unsere Großeltern haben die Sache mit dem Tropfen, der das



Fass zum Überlaufen bringt, auch schon treffend beschrieben.

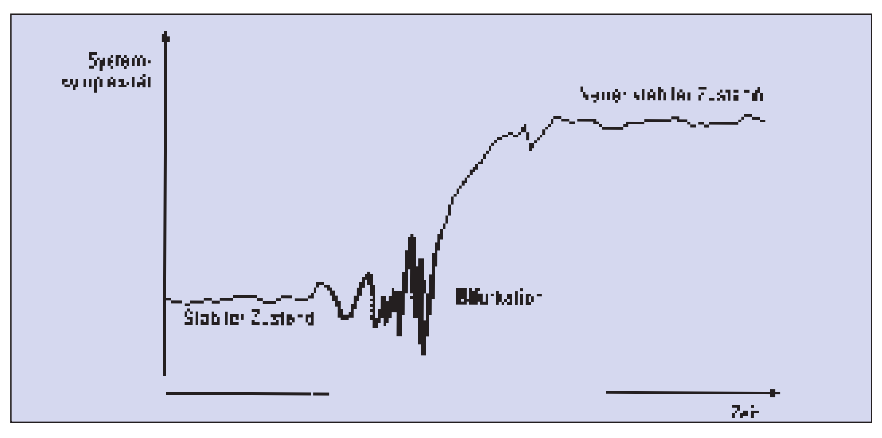
Rückkopplungskreise sind Gandolfi zufolge ein weiteres Charakteristikum komplexer Systeme: Ein Produkt der Firma *A* wird aus anfänglich rein zufälligen Gründen weniger verkauft als das des Konkurrenten. Der geringen Nachfrage wegen ist die Ersatzteilbeschaffung schwieriger, und darum entscheiden sich noch mehr Kunden für das Produkt des Konkurrenten, was Firma *A* in den Ruin treibt. Auch diese Situation können Opa und Oma ohne weitere Theoriebelastung mit dem Begriff „Teufelskreis“ ausdrücken.

Nach einem allgemeinen ersten Teil beschäftigt sich der zweite Teil des Buches mit Beispielen, unter dem etwas peinlichen Titel „Ein Sammelsurium komplexer Systeme“. In der Tat: Noch fehlt den Beispielen aus Biologie, Ökologie, Wirtschaft und Technologie der gemeinsame Nenner, und der Komplexitätswissenschaft mangelt es noch an Tiefgang, zumindest in Gandolfis Darstellung. Zudem sind die meisten Stücke aus dem Sammelsurium nicht neu: Wer hätte noch nicht davon gehört, dass sich Bakterien nicht so einfach ausrotten lassen, weil sie Resistenzen entwickeln, oder dass Tierpopulationen aus dem ökologischen Gleichgewicht geraten können,

wenn man einzelne Arten ausrottet oder nicht-endemische einführt?

Auf Formeln verzichtet der Autor mit der erklärten Absicht, dadurch die Lesbarkeit seines Werkes zu erleichtern. Allerdings weicht er damit auch der Aufgabe aus, zwischen quantifizierbaren und nicht quantifizierbaren Problemen zu unterscheiden, und so geht mancherorts Wissenschaft nahtlos in Spekulation über. Obwohl der Autor sich von Bewegungen wie „New Age“ distanziert, haben die vielen Titel, die er aus der auf Italienisch erschienenen Aufsatzsammlung „Physis: abitare la terra“ („Physis: die Erde bewohnen“) zitiert, einen eher spekulativen Charakter.

Unterhaltsam sind die Kapitel über Technologie und Komplexität. Hier finden sich einige Kuriositäten: Warum sind die Ägypter vom Wagen auf das Pferd umgestiegen, und warum gehen Uhren im Uhrzeigersinn? Die Frage, ob künstliches Leben und künstliche Intelligenz machbar sind, wird nicht von einem philosophischen Elfenbeinturm aus betrachtet, sondern mit konkreten und überraschenden Beispielen aus der Informationswissenschaft diskutiert. Könnten Menschen und Technologie bereits auf dem Weg sein, sich eines Tages zu einem Superorganismus zu vernetzen, ähnlich den Zellen, die auf einer Stufe höherer Komplexität etwas qualitativ Neues, nämlich Organismen bilden?

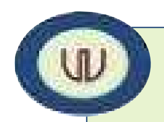


Nach einer langen Zeit relativer Stabilität, in der Störungen gedämpft werden konnten, tritt ein komplexes System in eine Instabilitätskrise („Bifurkation“), einen chaotischen Zustand, in dem seine Zukunft nicht vorhersehbar ist.

Aber das sind leider nur zwei von zwölf Kapiteln. Wer schon einmal etwas von der Chaostheorie gehört hat, eine vage Vorstellung davon hat, dass komplexe Systeme schwer zu manipulieren sind, und seine Ohren nicht völlig vor der Ökologiedebatte verschließt, kann sich die restlichen zehn Kapitel getrost schenken.

Sabine Stöcker

Die Rezensentin ist Biomathematikerin an der Universität Tel Aviv und zurzeit im Mutterschaftsurlaub.



5×5 Test® Sachbuch Top Ten März 2002

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezensionen: 21. Dezember 2001 bis 1. März 2002).

1. Christian Moullec
Mit den wilden Gänsen fliegen
Franckh-Kosmos, 121 Seiten, € 29,90

23 Punkte

2. Joachim Bublath
Chaos im Universum
Droemer Knaur, 231 Seiten, € 25,90

23

3. J. P. McEvoy
Sonnenfinsternis
Berlin-Verlag, 255 Seiten, € 19,–

22

4. Duncan Steel
Zielscheibe Erde
Wie Asteroiden und Kometen unseren Planeten bedrohen
Franckh-Kosmos, 160 Seiten, € 19,90

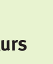
20

5. I. Wilmut, K. Campbell, C. Tudge
Dolly
Hanser, 384 Seiten, € 24,90

20

6. Hans Lenk
Kleine Philosophie des Gehirns
Primus, 160 Seiten, € 14,90

19

7. Christian Kassung
EntropieGeschichten
Robert Musils ‚Der Mann ohne Eigenschaften' im Diskurs der modernen Physik
Finck, 566 Seiten, € 46,40

19

8. J. Fried, J. Süßmann
Revolutionen des Wissens
C. H. Beck, 192 Seiten, € 9,90

18

9. Carl-Albrecht von Treuenfels
Tierwelten
DVA, 400 Seiten, € 49,80

18

10. Peter Düweke
Kleine Geschichte der Hirnforschung
C. H. Beck, 181 Seiten, € 9,90

18

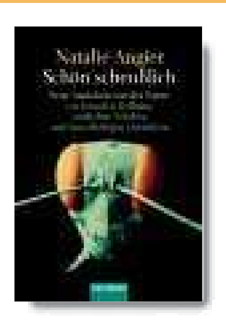
BIOLOGIE

Natalie Angier

Schön scheußlich

Neue Ansichten von der Natur: von brutalen Delfinen, zärtlichen Schaben und hinterhältigen Orchideen

Aus dem Amerikanischen von Susanne Kuhlmann-Krieg.
Goldmann, München 2001. 381 Seiten, € 8,45



Die wahre Scheherazade ist die Natur. Und wie Scheherazade zaubert Natalie Angier, die renommierte Wissenschaftskolumnistin der „New York Times", eine Überraschung nach der anderen aus dem Ärmel. Mit fundiertem Fachwissen, brillanter Eloquenz und feinsinnigem bis frechem Humor sagt die Pulitzer-Preisträgerin ihren Leserinnen und Lesern immer wieder: „Jede Geschichte, die die Natur uns erzählt, ist überwältigend."

In Deutschland hat sich Natalie Angier bereits im vergangenen Jahr mit ihrem Buch „Frau. Eine intime Geographie des weiblichen Körpers" einen Namen gemacht. In ihrem zweiten Buch bringt sie nunmehr 41 bunt gemischte Bio-Miniaturdramen: von den Rätseln der genetischen Information im Zellkern, von den Beziehungen zwischen Parasitismus und Sex, von menschlicher Hingabe und Kreativität, von Partnerschaft und elterlicher Fürsorge, von Genie und Wahnsinn, von Menstruation und Tod.

Angier beschreibt nicht nur Forschungsergebnisse, sondern auch Forscherpersönlichkeiten. Ihrer Begegnung mit dem Evolutionstheoretiker Stephen Jay Gould widmet sie ein eigenes Kapitel. Und in dem Beitrag „Die Furcht einer Enkelin" lässt sie den Leser an intimen Erlebnissen und Betroffenheiten angesichts des altersbedingten Persönlichkeitsverfalls ihrer eigenen Großmutter teilhaben.

Die Stärke der Autorin ist, das scheinbar Vertraute aus ungewohnter Perspektive zu beleuchten, aus schön scheußlich zu machen und umgekehrt. Der Delfin, ansonsten *everybody's darling*, mutiert zum rüpelhaften, ja brutalen Macho, der Mistkäfer erweist sich als größter Wohltäter der Menschheit, elterliche Zuneigung gerät zur subtilen Form der Ausbeutung, prachtvolle Orchideen stellen hinterlistige Fallen, und giftige Skorpione werden bei Mondenschein zu pinkfarbenen UV-Licht-Schönheiten. Und wo schon eine Schabe zur Gottheit avanciert, werden Proteine zu Anstandsdamen, und Steroidhormone treten als Darsteller kleiner Dramen auf.

Angier neigt – wie sie freimütig eingesteht – zu „schamloser" Vermenschlichung: „Ich unterstelle nicht-menschlichen Arten alle möglichen Persönlichkeiten, Absichten, Gefühle, Eindrücke, sogar Träume und Wünsche." Und das nicht nur, um Texte spannender und humorvoller zu machen, sondern weil „man niemals in der Lage sein wird, ein anderes Wesen zu verstehen, wenn man nicht bereit ist, mit ihm zu fühlen".

So vermenschlicht sie auch die DNA, aber nicht etwa der üblichen Vorstellung entsprechend als „wohltätigen Diktator", nach dessen Befehlen sich alle Lebensprozesse organisieren, sondern als „Durchschnittspolitiker", den „eine Horde von Proteinhandlangern und Beratern umgibt, die ihn zunächst einmal gut durchmassieren, drehen und wenden und gelegentlich auch einmal völlig ummodeln müssen, bevor er Sinnvolles leisten kann". So unterhaltsam kann Molekularbiologie sein, wenn die rechten Gene und eine adäquate Umwelt bei einer Autorin die Lust und das Talent zum Fabulieren gefördert haben.

Angier steht sicherlich nicht hinter allen Theorien, die sie vorstellt. Ihr genügt es, wenn die in ihnen enthaltenen Ideen ihre eigenen Empfindungen und ihr eigenes Denken über die Natur reflektieren. Das tut sie mit jenem journalistischen Schwung, der keine Angst vor der Kritik wissenschaftlicher Erbsenzähler kennt. Gelegentlich schießt sie über das Ziel hinaus. Aber gemessen daran, wie vergnüglich und erfolgreich sie einige der kompliziertesten Erkenntnisse der modernen Biologie vermittelt, ist das tolerierbar.

Da dieses Buch in den USA bereits 1995 erschienen ist, konnte auch die Überarbeitung manch alten Hut nicht auffrischen. So ist etwa die notorische Untreue vieler ehemals für streng monogam gehaltener Tierarten seit mehr als einem Jahrzehnt bekannt. Vorgebildete Leser sollten mehr auf neue Sichtweisen denn auf neue Fakten hoffen.

In ihrer Einleitung nimmt Angier vorweg, was abschließend über ihr Buch zu sagen ist: „Und wenn Sie manchem nur lange genug nachsinnen, um verächtlich die Nase zu rümpfen, so habe ich Sie doch immerhin unterhalten."

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und freier Journalist in Celle.

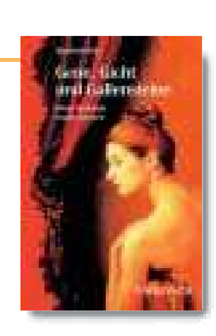
MEDIZIN

Manfred Reitz

Gene, Gicht und Gallensteine

Wenn Moleküle krank machen

Wiley-VCH, Weinheim 2001. 340 Seiten, € 24,90



Wie beeinflussen Moleküle die Weltgeschichte? Nun ja, unser ganzes Leben beruht, genau betrachtet, auf der Wirkung chemischer Signale, die durch Moleküle vermittelt werden; Krankheiten – vom banalen Schnupfen bis zu Erbkrankheiten, Virusinfektionen oder Krebs – zeichnen sich dadurch aus, dass diese Signale schädlich sind; und wenn es einer herrschenden Persönlichkeit schlecht geht, bleibt das nicht ohne Einfluss auf die Geschichte.

Die britische Königin Victoria (1819 –1901) vererbte an ihre Nachfahren und damit auch an den Zarewitsch Alexej die genetische Veranlagung zur Bluterkrankheit. Dessen schlechter Gesundheitszustand trug mit zum Fall der russischen Monarchie und zum Ausbruch der Oktoberrevolution bei. Einer von Victorias Amtsvorgängern, George III. (1738–1820), litt vermutlich unter einer Stoffwechselkrankheit namens akute intermittierende Porphyrie, die ihn zeitweise stark beeinträchtigte. Vielleicht hätte der amerikanische Unabhängigkeitskrieg ein anderes Ende gefunden, wenn ein gesunder Monarch regiert hätte?



Räumliche Struktur des Muskelproteins Myoglobin

Der Mikrobiologe und Publizist Manfred Reitz erzählt gleich eine Reihe solch spannender Geschichten, in denen krank machende Moleküle eine große Rolle spielen. In seinem sinnvoll gegliederten Buch bringt er zunächst etwa hundert Seiten Basiswissen: die Rolle chemischer Signale für die Funktion der gesunden Zelle, Mechanismen der Vererbung, Mutationen am Erbgut und zelleigene Reparaturmöglichkeiten. Schön, dass Reitz es nicht nur bei den bekannten Mendel-Erbsen belässt, sondern auch den Transfer zum Menschen vollzieht. So beschreibt er das „Habsburger Gesicht“, den zu großen Unterkiefer und das dadurch nach vorn gewölbte Kinn samt ausgeprägter Unterlippe, das jahrhundertelang charakteristisch für die Herrscher dieser Familie war. Ein Beispielporträt mitsamt einem Stammbaum für dieses Merkmal wäre allerdings hilfreicher gewesen als die vier Seiten Text mit derselben Information.

Im weiteren Verlauf geht Reitz – didaktisch hervorragend – von der allgemeinen Vererbungslehre immer mehr ins Detail. Zunächst beschäftigt er sich mit chromosomengebundenen Erbdefekten, dann mit fehlerhaften Genprodukten, die Krankheiten auslösen – etwa Stoffwechseldefekte wie Diabetes. Nach einem Abstecher in das Wesen von Krebserkrankungen folgen ausführliche und leicht verständliche Erläuterungen zu Krebs, Virus- und Prionerkrankungen und weiteren Leiden wie zur Alzheimer- und zur Parkinson’schen Krankheit.

In den letzten Kapiteln widmet sich Reitz dem eigentlichen heißen Eisen des Buches: Sorgsam vermittelt er die Grundlagen für das Verständnis möglicher gentherapeutischer Ansätze. Dabei spart er keineswegs ethische Fragestellungen aus und gibt eine Reihe von humangenetischen Beratungsstellen an.

Insgesamt ist Reitz ein populärwissenschaftlicher Überblick über Infektions- und Erbkrankheiten auf hohem Niveau gelungen. Seine Sprache ist sachlich, präzise und auch für Laien verständlich. Anschauliche Beispiele und kleine Exkurse mit zusätzlichen Informationen – etwa über den ersten bekannten Aids-Patienten in den USA oder über das „perfekte“ Verbrechen mit Hilfe einer Isoproterenol-Injektion, die einen chemischen Herzinfarkt auslöst – lockern die etwas trockeneren Fakten ein wenig auf und vermitteln interessante Details.

Dennoch ist das Buch nicht gerade leicht verdaulich: Um die komplexen Zusammenhänge, die Reitz in aller Kürze verständlich darstellt, wirklich zu durchblicken, braucht es schon etwas Zeit. Ein umfangreiches Register hilft beim schnellen Nachschlagen. Wünschenswert wäre ein Glossar, das die gebräuchlichsten Begriffe aus Medizin und Gentechnologie kurz erläutert.

Julia Bidder

Die Rezensentin ist Wissenschaftsjournalistin in Saarbrücken.

THEATER

Michael Frayn

Kopenhagen

Stück in zwei Akten

Aus dem Englischen von Inge Greiffenhagen und Bettina von Leoprechting.
Wallstein, Göttingen 2001. 272 Seiten, € 19,–

Carl Djerassi und Roald Hoffmann

Oxygen

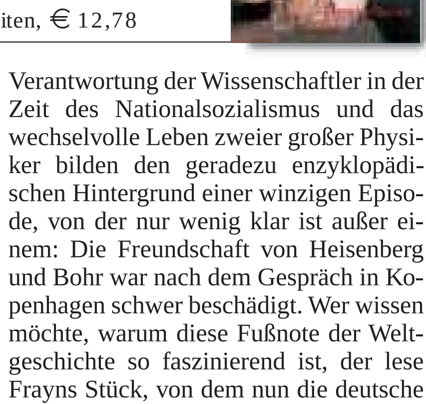
Aus dem Englischen von Edwin Ortmann.
Wiley-VCH, Weinheim 2001. 137 Seiten, € 15,90

Marc-Denis Weitze (Hg.)

„Oxygen“: Wissenschaft im Theater

Begleitbuch zur deutschsprachigen Erstaufführung

Deutsches Museum, München 2001. 142 Seiten, € 12,78



Dass die Naturwissenschaft samt dem Schicksal ihrer Protagonisten den Weg ins Theater finden kann, ist durch Bertolt Brechts „Galileo Galilei“, Friedrich Dürrenmatts „Die Physiker“ oder Heinar Kipphardts „In der Sache J. Robert Oppenheimer“ hinlänglich bewiesen worden. Längst gehören die Stücke zum Kanon des Deutschunterrichts. Trotzdem überraschte der große Broadway-Erfolg von Michael Frayns Stück „Copenhagen“ über das legendäre Treffen zwischen Werner Heisenberg und Niels Bohr im Jahre 1941.

Die komplexe Geschichte der Quantenmechanik und der Atombombe, die Verantwortung der Wissenschaftler in der Zeit des Nationalsozialismus und das wechselvolle Leben zweier großer Physiker bilden den geradezu enzyklopädischen Hintergrund einer winzigen Episode, von der nur wenig klar ist außer einem: Die Freundschaft von Heisenberg und Bohr war nach dem Gespräch in Kopenhagen schwer beschädigt. Wer wissen möchte, warum diese Fußnote der Weltgeschichte so faszinierend ist, der lese Frayns Stück, von dem nun die deutsche Übersetzung erschienen ist.



Roald Hoffmann posiert hinter einer Brennlinse im Laboratorium aus der Zeit Lavoisiers im Deutschen Museum.

Bohr, seine Frau Margrethe wie auch Heisenberg spielen nach ihrem Tod verschiedene Deutungen der Situation durch. Ohne große Hintergrundkenntnisse erschließen sich zumindest die moralischen und – teilweise sehr anrührenden – menschlichen Dimensionen des geheimnisumwitterten Treffens, bei dem es irgendwie um die Möglichkeit einer Atombombe ging. In Historikerkreisen herrscht in Bezug auf die Details keinerlei Einigkeit.

Das Schauspiel erweckt Neugier nach mehr Hintergrundinformation, und das Buch befriedigt sie durch eine gelungene Auswahl von Kommentaren namhafter Wissenschaftshistoriker, die zudem einen guten Eindruck von den Möglichkeiten und Grenzen der (Wissenschafts-)Geschichtsschreibung vermitteln. Zusammen mit dem umfangreichen Nachwort des Autors – ursprünglich für die amerikanische Buchfassung geschrieben – und einer Auswahlbibliografie ist der Kommentarteil mehr als doppelt so lang wie der Text des Stücks! Zu bemängeln ist dabei nur, dass zwar alle Kommentatoren vorgestellt werden, nicht aber der Autor, der nicht nur angesehener englischsprachiger Dramatiker, sondern auch Journalist, Dokumentarfilmer und Übersetzer ist.

Carl Djerassi und Roald Hoffmann nähern sich dem Thema „Wissenschaft im Theater“ auf andere Weise. Djerassi, amerikanischer Chemiker und „Mutter der Pille“ (so der Titel seiner Autobiografie), hat bereits als Romancier bewiesen, dass sich das Leben der Wissenschaftler-Community unterhaltsam darstellen lässt. Hoffmann, unter anderem Nobelpreisträger für Chemie, ist Autor mehrerer Essay- und Gedichtbände. Beide Autoren haben ein ambitioniertes Stück geschrieben, denn sie möchten – wie sie ausdrücklich im Vorwort erwähnen – mit „Oxygen“ sehr grundsätzliche Fragen behandeln: Was ist eine wissenschaftliche Entdeckung? Was bedeutet es, Erster zu sein?

Der Plot: Das Nobel-Komitee für Chemie möchte anlässlich des hundertjährigen Bestehens des Nobelpreises einen „Retro-Nobelpreis“ verleihen, mit dem eine bahnbrechende Entdeckung vor 1901 ausgezeichnet werden soll. Die Wahl fällt auf die Entdeckung des Sauerstoffs, für die es jedoch drei Anwärter gibt: Antoine Laurent Lavoisier, Carl Wilhelm Scheele und Joseph Priestley, alle drei Pioniere der modernen Chemie. Die Handlung springt zwischen einem fiktiven Treffen der drei Chemiker beim schwedischen König im Jahre 1777 und den Diskussionen des Komitees im Jahre 2001 hin und her. Was bei der bloßen Lektüre wie ein Lehrstück mit unübersichtlich vielen Szenen und Intermezzi wirkt, verwandelt sich bei einer gelungenen Inszenierung – wie die von Isabella Gregor bei der deutschen Uraufführung am Würzburger Mainfrankentheater – durchaus in temporeiches und witziges Theater.

Ein anregendes Begleitbuch des Deutschen Museums in München spannt das Stück – legitimerweise – vor den Karren des „Public Understanding of Science“. Es liefert interessante Informationen über die Autoren, Entstehung und Inszenierung von „Oxygen“, die Geschichte der Chemie und speziell die Entdeckung des Sauerstoffs sowie Einblicke in die aktuelle Forschung und Vorschläge für den Einsatz von „Oxygen“ im fächerübergreifenden Schulunterricht.

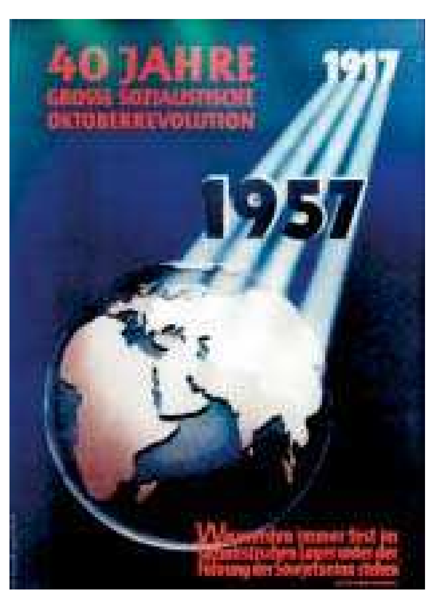
Vielleicht ist das Stück zumindest für ein Laienpublikum etwas überfrachtet. Trotzdem ist es ein viel versprechender Versuch in dem Genre, das Djerassi „Science in theatre“ nennt.

Alexander Pawlak

Der Rezensent ist Diplom-Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Marburg.

Das Beziehungsnetz der Geschichte







Das Deutsche Historische Museum unterhält einen reichen Fundus politischer Plakate.

Man lästere nicht voreilig über die Unfähigkeit des öffentlich-rechtlichen Wissenschaftssystems. Wenn sich mehrere staatlich finanzierte Institute zusammentun, kommt manchmal etwas sehr Beeindruckendes dabei heraus. Diesmal sind es das Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik (ISST), das Deutsche Historische Museum (DHM) in Berlin und das Haus der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland (HdG) in Bonn; der Verein zur Förderung eines deutschen Forschungsnetzes (DFN-Verein) und indirekt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geben auch etwas dazu. Das Ergebnis heißt „Lebendiges virtuelles Museum Online“ und ist unter www.dhm.de/lemo zu finden.

Allerdings ist die Softwaretechnik nicht das Bemerkenswerte an der Website. Man hat die Auswahl zwischen der klassischen (HTML-) und einer dreidimensionalen, vom Benutzer steuerbaren (VRML-)Präsentation – und tut gut daran, sich auf das Klassische zu beschränken. Die VRML-Designer bieten kaum mehr als ein paar mühsam mit Sinn beladene geometrische Formen; mehr hätte die Ladezeiten zu weit hochgetrieben. An Inhalten kommt auch nur das, was man einfacher in HTML zu sehen bekommt: Die Bedienung des VRML-Browsers ist gewöhnungsbedürftig.

Dagegen haben die Autoren der Website in der altehrwürdigen Philologie erstklassige Leistungen vollbracht. Thema ist die Geschichte Deutschlands von 1900 bis 2000, und dazu gibt es wahrhaftig viele Ereignisse, viele Geschichten handelnder Personen, viele Zusammenhänge zu erzählen. Die biedere Technik des Hyperlinks genügte, um unter den Teilen des Materials ein sehr dichtes, attraktives Beziehungsnetz zu knüpfen.

Kollektives Gedächtnis

Zum Eingang findet der Benutzer das vergangene Jahrhundert in die nahe liegenden Epochen aufgegliedert und zu jeder Epoche eine Auswahl an zusammenfassenden Essays angeboten. Zahlreiche Verweise führen in die reichlich gefüllte Materialkammer: Fast 3400 Einzelexponate (darunter zahlreiche Fotos und Plakate), 196 Dokumente (Reden, Gesetze, Verträge), 244 Hörbeispiele, 199 Videos und 236 Erinnerungen von Einzelpersonen („kollektives Gedächtnis“) bilden das Rohmaterial, das durch 100 Chroniken (eine für jedes Jahr) und 770 Biografien weiter erschlossen wird.

Die Zeithistoriker haben die heikle Aufgabe, das Leben noch aktiver Politiker und damit auch ihrer offiziellen Geldgeber zu beschreiben, mit Bravour gelöst. Das Wiedersehen mit dem Porträt manches Prominenten, als er noch weniger grau und faltig war, macht Freude. Dass die meisten Biografien 1999 enden und Bill Clinton noch nicht unter den Beschriebenen ist – man soll nicht zu viel verlangen.

Muss ein solches Projekt öffentlich-rechtlich sein? Nicht unbedingt. Die von dem amerikanischen Sender A&E TV betriebene Website www.HistoryChannel.com bietet nicht nur die letzten hundert Jahre, sondern die ganze Weltgeschichte, aus amerikanischer Perspektive. Das Material ist ähnlich reichhaltig und ebenso intensiv intern verknüpft; wegen der viel größeren Zeitspanne enthält es weniger Einzelheiten pro Jahr. Viel Werbung und ein kurzer Link zum eigenen Internet-Shop scheinen das anspruchsvolle Projekt zu finanzieren. Die Schwester-Website www.biography.com informiert einen ausreichend über Clinton; dass sie Helmut Kohl (mit Copyright 2001) noch für den deutschen Bundeskanzler hält – man soll nicht zu viel verlangen.

Gemessen an dem großen bunten amerikanischen Vorbild wirkt der deutsche Nachahmer www.weltchronik.de kläglich. Die betreibende Softwarefirma ICA-D (International Consultants Agency Deutschland) ist offensichtlich zu klein, um den erforderlichen Aufwand über den Werbeetat wegzustecken, und muss deswegen für ein deutlich mageres Angebot ziemlich penetrant beim Benutzer die Hand aufhalten.

Schade, dass es noch keinen allgemein verbreiteten, bequemen Mechanismus zur Bezahlung von Kleinbeträgen über das Internet gibt. So viel wie für eine SMS wäre man ja für ein Informationshäppchen zu zahlen bereit …

Christoph Pöppe

Gewinnen im Zahlenlotto

Kann man gegen die Lottogesellschaft gewinnen? Auf die Dauer sicher nicht – aber gegen die Mitspieler immerhin ein bisschen.

Von Hans Riedwyl

Wie erzielt man den größten Gewinn beim Lotto? Indem man die sechs Zahlen tippt, die nächsten Samstag aus der Lostrommel fallen werden. Aber die weiß man natürlich vorher nicht. Gibt es denn ein ernst zu nehmendes „System", das heißt eine Strategie, mit der man, wenn schon nicht diese Woche, dann wenigstens auf die Dauer maximale Gewinne einfahren kann?

Auf diese Frage kann die Statistik eine Antwort geben. Die Größe, die man maximieren möchte, heißt „Erwartungswert der Auszahlung" und ist der Durchschnittsgewinn, dem man auf die Dauer immer näher kommen wird, wenn man sehr oft spielt.

Die erste Auskunft ist einfach und enttäuschend. Die profitabelste Strategie ist, gar nicht zu spielen. Die staatlich kontrollierte Lotteriegesellschaft verteilt nämlich in der Regel nur etwa die Hälfte ihrer Einnahmen pro Spiel nach einem bestimmten Schlüssel auf die Gewinnkategorien („Ränge") und innerhalb dieser gleichmäßig auf die Gewinner. Im ersten Gewinnrang („sechs Richtige") sind jene, die alle sechs zufällig gezogenen Zahlen auf einem Tipp angekreuzt haben. Im zweiten Rang gewinnen in der Regel jene, die fünf der sechs gezogenen Zahlen richtig getippt haben. Häufig wird noch eine siebente Zahl, die „Zusatzzahl", aus den verbleibenden gezogen, und „fünf Richtige mit Zusatzzahl" bildet eine eigene Gewinnkategorie. Oder es wird unabhängig eine „Superzahl" aus einer Urne zufällig gezogen und eine höchste Gewinnkategorie mit sechs Richtigen plus Superzahl gebildet. Sind in den höchsten Gewinnrängen einmal keine Gewinner, so wird oft die Gewinnsumme als Jackpot in einen Topf gelegt und auf die nächste Ausspielung übertragen. Mit wachsendem Jackpot wird dadurch die Höchstgewinnsumme größer, was die Beteiligung und damit den Umsatz der Gesellschaft beträchtlich erhöhen kann. Das Lottospiel bezieht seinen Reiz daraus, dass sehr hohe Beträge an Einzelgewinner ausbezahlt werden; mit kleinen Gewinnen für nur drei oder vier Richtige animiert man zum Weiterspielen.

Wie auch immer das Geld auf die Ränge verteilt wird: Es ist stets nur die Hälfte der Gesamteinnahmen. Mit den restlichen Einnahmen sponsert die Gesellschaft nach Abzug administrativer Kosten sportliche, kulturelle oder andere öffentliche Projekte, die sonst vom Staat mitfinanziert werden müssten, oder führt Lotteriesteuer direkt an den Staat ab. Das bedeutet: Ein hinreichend reicher Mensch kann zwar mit absoluter Sicherheit sechs Richtige erzielen (und, als „Zugabe", sechs Mal fünf Richtige, fünfzehnmal vier Richtige und so weiter), indem er alle denkbaren Kombinationen auf einmal spielt. Aber er würde von seinem Einsatz im Erwartungswert allenfalls die Hälfte zurückbekommen – jedenfalls, wenn man den Jackpot außer Acht lässt.

Eine solche Spielweise ist übrigens für einen mittelgroßen Millionär durchaus in Reichweite. Es sind r Zahlen aus s möglichen auszuwählen. In Deutschland gilt $s=49$, in Österreich und in der Schweiz $s=45$; in allen drei Ländern ist $r=6$. Dem Spieler stehen für sein erstes Kreuz s Plätze zur Verfügung, für das zweite $s-1$ und so weiter; für seine letzte (r-te) Entscheidung hat er noch $s-r+1$ Plätze zur Auswahl. Insgesamt also $s(s-1)\ldots(s-r+1)$. Doch sind von diesen Möglichkeiten viele identisch, da es nicht auf die Reihenfolge des Ankreuzens ankommt. Also müssen wir das Produkt durch die Anzahl der Möglichkeiten, wie die r Zahlen angeordnet sein können, dividieren. Dies ist das Produkt der ersten r Zahlen $1\times2\times\ldots\times r$, was als $r!$ („r-Fakultät") geschrieben wird. Insgesamt wird die Anzahl der Möglichkeiten, r aus s Zahlen auszuwählen, als Binomialkoeffizient bezeichnet und wie folgt geschrieben:

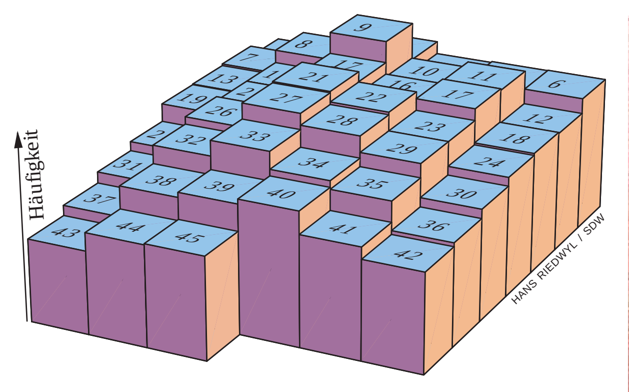
$$\binom{s}{r} = \frac{s!}{r!(s-r)!}$$

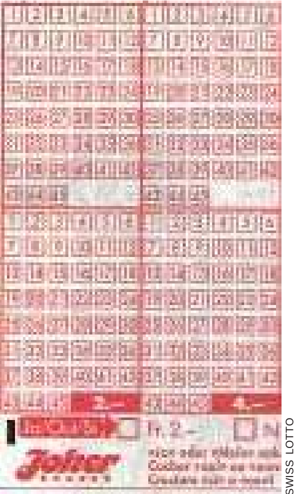
Für $s=49$ und $r=6$ ergibt sich aus dieser Formel 13 983 816. Im deutschen Lotto kann man sich also mit knapp vierzehn Millionen Tipps einen garantierten Hauptgewinn holen; in Österreich und der Schweiz ist dieses Vergnügen bereits mit 8 145 060 Einsätzen zu haben. Entsprechend gering ist die Wahrscheinlichkeit, mit einem einzigen Tipp sechs Richtige zu treffen, nämlich (in Deutschland) 1 durch 14 Millionen oder ungefähr 7×10^{-8}. Bei einer typischen Anzahl von 100 Millionen Tipps pro Spiel müsste es also im Durchschnitt ungefähr sieben Hauptgewinner pro Ausspielung geben.

Das gilt unter zwei Voraussetzungen: Erstens ist das Spiel fair, das heißt, die Lottomaschine zieht jede Kugel mit gleicher Wahrscheinlichkeit, und verschiedene Ziehungen sind voneinander unabhängig. Zweitens wählen die Spieler, ebenso wie die Lottomaschine, jede mögliche Kombination mit gleicher Wahrscheinlichkeit.

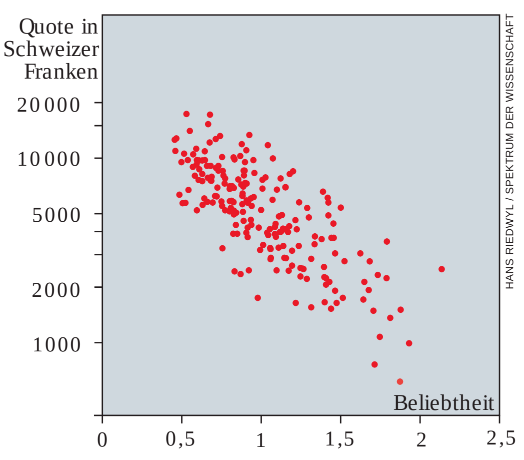
Die erste Voraussetzung ist mit hinreichender Genauigkeit erfüllt. Jedenfalls lassen die Abweichungen von der Gleichhäufigkeit, die für gezogene Zahlen der Vergangenheit zu beobachten sind, keinen Schluss auf systematische Fehler des Ziehungsgerätes zu.

Dagegen weicht das tatsächliche Verhalten der Spieler weit von der zweiten Voraussetzung ab. Sonst könnte man die Anzahl der Gewinner in jeder Kategorie im Durchschnitt mehrerer Ausspielungen





Zahlen in der Mitte des Lottofeldes werden häufiger angekreuzt als randständige und kleine häufiger als große. Das Säulendiagramm zeigt die relative Häufigkeit der Lottozahlen im Schweizer Lotto 1997 und 1998. Die Anordnung der Felder ist wie auf dem Schweizer Lottoschein (rechts).



HANS RIEDWYL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Gewinnquote für fünf Richtige, auf einer logarithmischen Skala aufgetragen gegen die Beliebtheit der gezogenen Kombination für alle schweizerischen Ausspielungen der Jahre 1997 und 1998. Je beliebter der Tipp, desto geringer die Quote.

gut voraussagen. Vor allem würde sich die Standardabweichung, also die durchschnittliche Abweichung von der durchschnittlichen Gewinnerzahl, in einem vorhersagbaren Rahmen halten. Doch dies trifft nicht zu. In der 3. Ausspielung des Jahres 1988 gab es 222 Sechser, weit mehr als die zu erwartende Anzahl von 7.

Ein Blick auf das deutsche Tippfeld zeigt den Grund für diese hohe Zahl: Die gezogenen Zahlen 24, 25, 26, 30, 31 und 32 bilden einen Block in der Mitte des Tippfelds. Offensichtlich neigen viele Spieler dazu, ihre Kreuzchen in Form eingängiger Muster zu machen.

Die systematische Abweichung der Spieler von der Gleichverteilung gibt uns die einzige Chance in die Hand, unseren Lottogewinn zu maximieren, genauer gesagt: den zu erwartenden Verlust zu minimieren. Ein Sechser ist ein extrem unwahrscheinliches Ereignis, daran ist nichts zu ändern; aber wir können etwas dafür tun, dass wir uns den Gewinn mit niemandem teilen müssen, wenn es denn eintrifft. Allgemein ist es zweckmäßig, anders zu spielen als die anderen.

Aber wie spielen die anderen? Zur Beantwortung dieser Frage müssen alle Tipps einer oder mehrerer Ausspielungen statistisch aufbereitet werden. Erst in den letzten Jahren ist es dank der Computerentwicklung einfach geworden, so große Datenmengen zu analysieren und interpretieren. Dieses neue Teilgebiet der Statistik hat den Namen „Data Mining“ bekommen.

Die schweizerische Lotteriegesellschaft Swiss Lotto hat uns die 7 Milliarden Zahlen aller Tipps der Jahre 1997 und 1998 zur Verfügung gestellt. Deren Untersuchung förderte überraschende Strukturen zu Tage.

So wird keineswegs jede Zahl von 1 bis 45 auch nur annähernd gleich häufig angekreuzt. Vielmehr wählen die Spieler tendenziell lieber kleine als große Zahlen und vernachlässigen die Zahlen am Rande des Feldes zu Gunsten derjenigen in der Mitte (Bild links unten). Spitzenreiter ist die 9 mit einem Beliebtheitsquotienten (Häufigkeit geteilt durch Durchschnittshäufigkeit) von 1,4; die unbeliebteste, die 43, bringt es nur auf einen Quotienten von 0,6. Die Bevorzugung kleiner Zahlen und speziell der 9 ist wahrscheinlich dadurch zu erklären, dass viele Spieler Geburtsdaten in ein- und zweistellige Zahlen verwandeln.

Man könnte nun vermuten, dass ein Tipp um so beliebter ist, je beliebter die in ihm enthaltenen Zahlen sind. Bezeichnen wir das Produkt der sechs Beliebtheitsquotienten dieser Zahlen als die Beliebtheit des Tipps, so können wir bestätigen, dass ein Tipp im Erfolgsfall umso weniger Gewinn einbringt, je beliebter er ist (Bild links oben). Statt der Beliebtheit kann man auch die Summe aller Zahlen eines Tipps oder die Anzahl der randständigen Zahlen als Kenngröße verwenden, mit ähnlich eindeutigem Ergebnis.

Eine solche grobe „Makrodatenanalyse“ mittels einer linearen Regression kann bereits einen beachtlichen Anteil der Variabilität in den Gewinnquoten erklären. Aber bisher haben wir die Beziehungen unter den Zahlen eines Tipps noch gar nicht berücksichtigt. Dafür gilt es, in einer so genannten Mikrodatenanalyse die Tipphäufigkeit jeder einzelnen Zahlenkombination auszuzählen.

Eine solche Liste, nach Häufigkeit sortiert, bringt interessante Ergebnisse (Bild unten). Unter den Top Ten sind in allen Ausspielungen vorwiegend Zahlenkombinationen, die auf dem Tippfeld ein einfaches Muster bilden, zum Beispiel eine schräge Linie (1, 8, 15, 22, 29, 36) oder eine horizontale Gerade, wie (1, 2, 3, 4, 5, 6). Alle arithmetischen Folgen (solche, bei denen die Differenz aufeinander folgender Glieder konstant ist) sind stark vertreten. Ein guter Spieler muss diese einfachen Figuren auf dem Tippfeld unbedingt vermeiden, sonst wird sein Gewinn auch bei sechs Richtigen sehr mager ausfallen.

Frühe Lottospiele

Bereits im 16. Jahrhundert wurden in italienischen Städten Lotterien organisiert, bei denen 5 aus 90 gezogen wurden. In einem Briefwechsel mit Friedrich dem Großen berechnete Leonhard Euler die Gewinnwahrscheinlichkeiten und -erwartungen für diese Lottospiele und berichtete 1763 darüber vor der Berliner Akademie. Er habe auch selbst gespielt und einmal einen beachtlichen Lotteriegewinn von 600 Reichstalern erhalten.

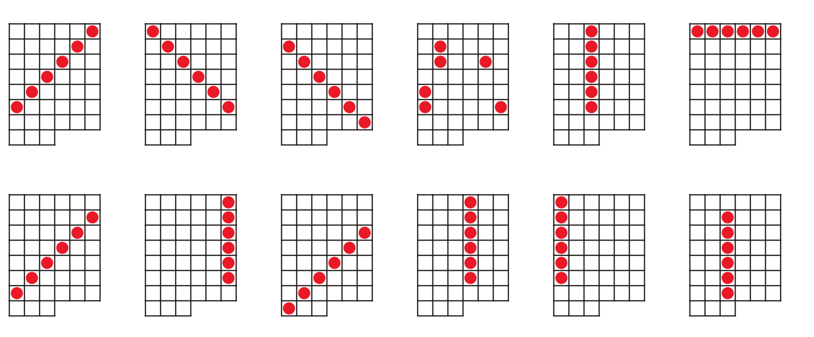


Leonhard Euler (1707–1783) aus Basel war der produktivste Mathematiker seines Jahrhunderts.

SCHWEIZERISCHE NATIONALBANK

In der Liste der meistgewählten Tipps finden sich Systematiken aller Art. So kennen – oder erfinden – Lottospieler die Fibonacci-Folge, bei der jedes Glied gleich der Summe seiner beiden Vorgänger ist. Jedenfalls tippen in jedem Spiel regelmäßig rund fünfzig Personen die Folge (3, 5, 8, 13, 21, 34).

Überdurchschnittlich häufig tippen die Spieler auch auf Gewinnkombinationen vergangener Ziehungen. Rational ist das kaum zu erklären. Selbst wenn man dem Lotteriegerät fälschlich ein Ge- ▶



HANS RIEDWYL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

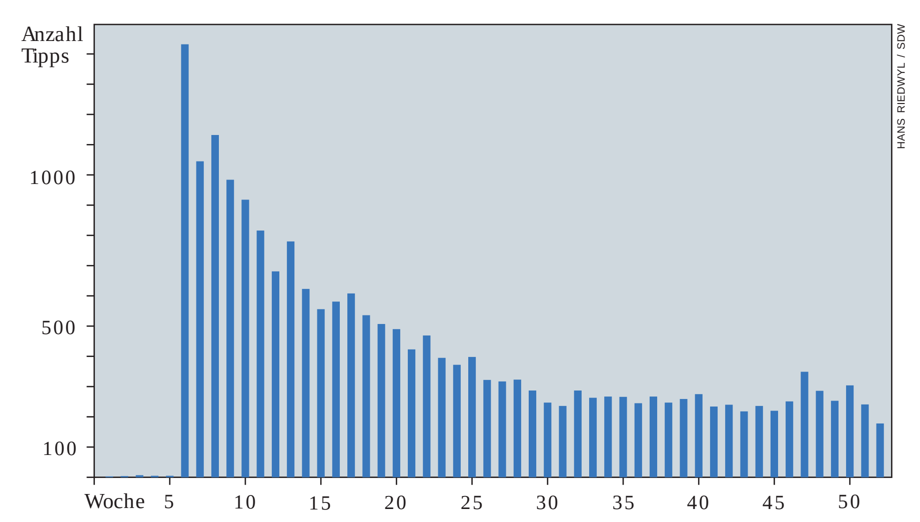
Die zwölf häufigsten Tipps der 6. Ausspielung des Jahres 1990 im Schweizer Samstagslotto. Offensichtlich haben die Spieler eine ausgeprägte Vorliebe für einfache arithmetische Folgen, symmetrische Muster – und die Zahlen aus jüngst vergangenen Ziehungen: Der vierthäufigste Tipp ist gleich der Ziehung der Vorwoche.

(Seiten 116, 117 und 118: Anzeige und Beihefter)

dächtnis unterstellt, müsste dieses doch eher darauf gerichtet sein, Wiederholungen zu vermeiden als sie zu erzeugen.

Die Häufigkeit, mit der eine vergangene Kombination getippt wird, nimmt mit dem Abstand zu deren Ziehung vorerst annähernd exponentiell ab, aber der Effekt ist noch Wochen später deutlich spürbar (Bild rechts). Die Lehre daraus: Wähle nie Zahlen, die früher gezogen wurden, auch nicht von anderen Lotterien. So sind 1977 einmal im deutschen Lotto die Zahlen der niederländischen Ziehung der Vorwoche eingetroffen, was 205 Sechser ergab – ein Rekord, der erst elf Jahre später mit den genannten 222 Sechsern übertroffen wurde. Manche Spieler verändern diese Zahlen, etwa indem sie zu jeder Zahl eine positive oder negative Konstante addieren. Ähnliche Muster zeigen Tippempfehlungen in den Medien.

In der fünften Woche 1998 erzeugte das Ziehungsgerät von Swiss Lotto die Zahlen (7, 8, 17, 19, 27, 29). Es gab fünf Sechser – für dieses Jahr und für Schweizer Verhältnisse eine Rekordmenge. Auch in früheren Spielen war diese Kombination regelmäßig ungefähr drei- bis siebenmal vertreten, die noch regelmäßigere (7, 9, 17, 19, 27, 29) sogar 50- bis 80-mal. Man stelle sich vor, diese Kombination wäre einmal und in der darauf folgenden Woche noch einmal gezogen worden! Es wäre mit mehr als tausend Gewinnern und einer entsprechend enttäuschenden Quote zu rechnen gewesen.



So oft wurde 1998 im Schweizer Lotto die Kombination (7, 8, 17, 19, 27, 29) getippt: die Gewinnzahlen der fünften Ziehung. Unmittelbar nach der Ziehung kreuzten 1432 statt zuvor durchschnittlich 5 Spieler diese Zahlen an; die Anzahl hielt sich – nach exponentiellem Abfall – noch über ein Jahr auf überdurchschnittlichem Niveau. Dieses Verhalten ist regelmäßig zu beobachten.

Spiele anders als die anderen

Am 20. Juni 1998 wurden in der deutschen Lotterie die Zahlen (19, 27, 29, 31, 38, 44) gezogen. Es gab stolze 54-mal sechs Richtige, aber die glücklichen Gewinner erhielten nur je rund 140 000 DM. Drei Wochen später berichteten die Medien, dass diese Zahlen wenige Wochen zuvor in einem Horoskop einer Zeitschrift als Glückszahlen abgedruckt waren. Schlug sich dieses Ereignis auch in der Schweiz nieder? Tatsächlich sind dort dieselben Zahlen nach der Veröffentlichung des Horoskops etwa 20-mal getippt worden, nach der Ziehung im deutschen Lotto sogar 200-mal. Nach der Publikation der Geschichte in den Medien kann man erneut eine Zunahme dieses Tipps feststellen.

Die Anweisung „Spiele anders als die anderen“ mündet also in eine Fülle von „Verboten“: Spiele keine arithmetischen Folgen, keine symmetrischen Muster und keine Kombination, die aus einer einfachen Anweisung hervorgeht (Quadratzahlen, Primzahlen, Fibonacci-Zahlen). Lege keinen Vorzug auf kleine und nicht-randständige Zahlen. Spiele keine Kombination, die jüngst in irgendeiner Ausspielung vorkam oder die in der Presse empfohlen wird – auch nicht in „Spektrum der Wissenschaft“. Es wäre sehr einfach, hier eine Kombination anzugeben, die sämtliche genannten Verbote einhält. Aber wenn Sie die tippen, müssen Sie damit rechnen, dass zahlreiche Leser es Ihnen gleichtun und Ihnen damit die Quote verderben. Jede brauchbare Empfehlung muss sehr viele Tipps zulassen, damit auch viele Leute, die dieser Empfehlung folgen, einander nicht auf die Füße treten. Hier ist eine solche Empfehlung:

Bestimmen Sie Ihre Zahlen ebenso wie die Lottogesellschaft mit einem Ziehungsgerät, ziehen Sie 6 aus 49 mit Zahlen beschrifteten und sorgfältig gemischten Spielkarten oder nutzen Sie den Pseudo-Zufallszahlengenerator, den manche Lotteriegesellschaften unter dem Namen „Quickpick“ anbieten. Wenn dabei zufällig eine „verbotene“ Kombination (regelmäßiges Muster, arithmetische Folge, die Lottozahlen von letzter Woche …) erscheint, kann man sie ja verwerfen und noch einmal den Zufall entscheiden lassen.

Für die oben genannte fünfte schweizerische Ausspielung von 1998 sind rund 7,3 Millionen Tipps abgegeben worden. Wären alle Tipper dem Zufallsprinzip gefolgt, so wäre zu erwarten gewesen, dass ungefähr sechzig Prozent aller überhaupt möglichen Kombinationen auch getippt wurden. Da aber viele Spieler die gleichen Kombinationen ankreuzten, betrug diese so genannte Abdeckung nur fünfzig Prozent. Damit hat derjenige, der streng nach dem Zufallsprinzip spielt, eine Chance von immerhin fünfzig Prozent, Alleingewinner zu werden, falls seine Zahlen auch gezogen werden. Nur in seltenen Fällen würde ihn der Zufall mit vielen Spielern in einen Topf werfen.

Kann man dieses Wissen nun nutzen, um aus einer Lotterie im Erwartungswert mehr herauszuholen als den eigenen Einsatz? Kann man auf diese Weise auf die Dauer Geld von seinen Mitspielern, die den üblichen Tippgewohnheiten folgen, aufs eigene Konto lenken, zum Beispiel indem man mit Millionenaufwand auf sämtliche nicht „verbotenen“ Kombinationen setzt? Wohl kaum. Es müsste schon in Form eines wohlgefüllten Jackpots das Geld der Mitspieler aus mehreren Runden zusammenkommen. Und selbst dann müsste man dieses Spiel treiben, bevor andere auf dieselbe Idee kommen und einem den schönen Gewinn verdünnen. ■

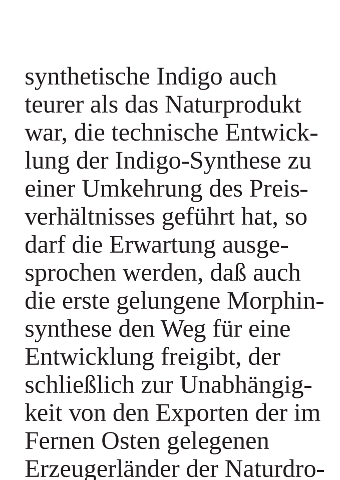


***Hans Riedwyl** ist emeritierter Professor für angewandte mathematische Statistik an der Universität Bern mit Forschungsschwerpunkten in der multivariaten und nichtparametrischen Statistik.*

Literaturhinweise

How to Win More. Strategies for Increasing a Lottery Win. Von Norbert Henze und Hans Riedwyl. A K Peters, Natick (Massachusetts) 1998.

Zahlenlotto. Wie man mehr gewinnt. Von Hans Riedwyl. Haupt, Bern 1990.



Ein neuartiger Beruf: Regenmacher

Für die Praxis ergeben sich zwei Möglichkeiten, die Wolke zu „reizen“. Man kann einmal aus einem Flugzeug winzige Eisteilchen von oben her in die Wolke rieseln lassen oder aber am Erdboden einen entsprechenden „Rauch“ erzeugen, also den „Zündfunken“ an den unteren Rand der Wolke legen. In jedem Fall müssen aber Wolken am Himmel sein. … 30 Quadrillionen submikroskopischer Kristalle in einer Minute bläst der Kricksche Bodengenerator in die Luft, und jedes dieser Partikel wird in der Wolke zu einem Regentropfen. Hierzu wird mit Silberjodid gesättigter Koks auf eine Temperatur von 1383 °C bis 1648 °C gebracht. Akkumulator, Fülltrichter, Rauchentwickler und Gebläse sind die wesentlichen Teile der Anlage. … Bei dem ersten Versuch dieser Art bei Albuquerque in Neumexiko fiel über einer Fläche von mindestens 10 000 Quadratkilometer eine Regenmenge von 9 Millimeter. *(Das Neue Universum, 69. Bd., 1952, S. 306)*



Ein Gerät zur Erzeugung künstlichen Regens

Morphinsynthese gelungen

Nach der 1925 erfolgten Aufklärung der chemischen Konstitution des Morphiums setzten sofort Versuche zur Synthese dieses Narkotikums ein, die jedoch vergeblich blieben. Nunmehr kommt aus den USA die Nachricht, daß es im Chemischen Institut der Universität Rochester (New York) gelungen sei, Morphium synthetisch darzustellen. Das Verfahren sei allerdings so umständlich – es erfordert 27 Arbeitsgänge – und kostspielig, daß an eine industrielle Auswertung noch nicht zu denken sei. Wenn man bedenkt, daß z. B. der erste synthetische Indigo auch teurer als das Naturprodukt war, die technische Entwicklung der Indigo-Synthese zu einer Umkehrung des Preisverhältnisses geführt hat, so darf die Erwartung ausgesprochen werden, daß auch die erste gelungene Morphinsynthese den Weg für eine Entwicklung freigibt, der schließlich zur Unabhängigkeit von den Exporten der im Fernen Osten gelegenen Erzeugerländer der Naturdroge führt. *(Chemiker-Zeitung, 76. Jg., 1952, Nr. 8, S. 170)*

Späte Berufswahl

Dr. Albert Einstein, mehr noch als andere Prominente oft von Reportern besucht, wurde kürzlich von Mr. David Eisendraht für *Photography* photographiert. „Sie sind Wissenschaftler, Mathematiker, Lehrer und Autor. Was geben Sie eigentlich an, wenn Sie jemand nach Ihrem Beruf fragt?“ erkundigte sich Eisendraht bei Einstein. „Mein Beruf?“ war Einsteins Antwort, „Photo-Modell“. *(Photo-Magazin, März 1952, S. 70)*

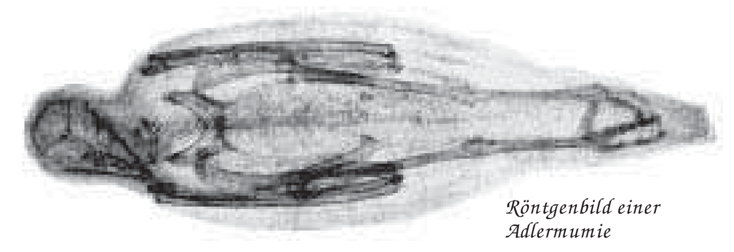


Gewitter-Vorhersage

Ein Apparat zur Anmeldung von Gewittern ist in der amerikanischen Stadt Cleveland (Ohio) aufgestellt worden. Er besteht aus einem Electricitätssammler und einem Stromkreis, in dem eine Glocke und ein Uhrwerk mit einem Cylinder eingeschlossen sind. Wenn innerhalb einer Wolke eine heftige electrische Entladung stattfindet, so werden die electrischen Wellen den Sammler erregen und den Stromkreis schließen. Solange die Einwirkung der electrischen Entladung dauert, zeichnet ein Schreibstift auf dem Cylinder seine Zeichen ein, aus denen der Verlauf des Gewitters am Beobachtungsort zu entnehmen ist. *(Der Kulturtechniker, 5. Jg., 1902, S. 147/148)*

Ägyptische Tiermumien

Der Generaldirektor der ägyptischen Altertumsbehörde Maspéro hatte über 1000 Vogelmumien nach Frankreich geschickt, wo sie im Museum zu Lyon geöffnet und von Lortet und Gaillard untersucht wurden. Davon waren mehr als 500 so wohl erhalten, dass die Beschaffenheit des Skeletts genau untersucht werden konnte. Einige davon, besonders verschiedene Falken, ein Ibis und eine Mandelkrähe, konnte man an ihrem Federkleid ohne weiteres erkennen. Die Vogelmumien bilden zwei Gruppen: die der Ibisse und die der Raubvögel. Sie stammen aus den Gräbern von Sakkarah, Gizeh und anderen Örtlichkeiten und rühren teils aus der ptolemäischen, teils noch aus der römischen Zeit her. … Eine äusserst einfache Untersuchungsmethode für solche Mumien ist die Röntgenaufnahme, deren wir eine abbilden. *(Die Umschau, 6. Jg., Nr. 11, 1902, S. 215/216)*



Röntgenbild einer Adlermumie

Die Grossstadt der Zukunft

In der Zeitschrift „Die Reform“ findet sich ein interessanter Aufsatz von Bill Archer. Der Verfasser begeht den Fehler, die Stadtentwicklung nur vom Standpunkte des Verkehrs zu betrachten, den künstlerischen und sozialen dagegen zu vernachlässigen. … Nichtsdestoweniger haben Archer’s Zukunftsgedanken einen großen Reiz: In hundert Jahren werden wir vermutlich Grossstädte besitzen, die bei 20, 30 oder 40 Millionen Einwohner einen Durchmesser bis zu 100 Kilometer aufweisen. Das rechtwinklige Strassennetz wird bis dahin, dem Zwange des Verkehrsbedürfnisses folgend, ergänzt werden durch viele, über den ganzen Stadtplan verteilte diagonale Strassen, in welchen der Verkehr sich anhäuft. Diese Anhäufung wird vermieden, … wenn man sich entschliessen kann, den quadratischen Grundaufbau der Stadt zu verlassen und statt dessen eine Zusammenstellung von sechseckigen Häuserblöcken vorzunehmen, in der Art von Bienenwaben. *(Die Umschau, 6. Jg., Nr. 12, 1902, S. 221)*

Auf der Wippe

von Natalie van Eijk

Fritz arbeitet in Tante Emmas Laden. Vor ihm stehen eine Wippe mit exakt gleichen Hebeln sowie fünf zylindrische, gleich aussehende Gewichtsstücke mit den Massen 1 kg, 2 kg, 3 kg, 4 kg und 5 kg. Nur das 2-kg-Gewicht ist beschriftet.

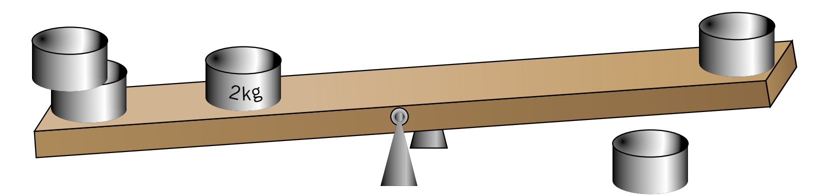
Tante Emma macht ihm einen Vorschlag: „Wenn du mir, nachdem wir alle Gewichte auf die Wippe gestellt haben, mit Sicherheit sagen kannst, wie schwer jedes der Gewichte ist, kannst du früher nach Hause. Damit das nicht zu einfach für dich wird, machen wir dies folgendermaßen:

Du sagst mir nacheinander, welches Gewicht ich an welcher Stelle auf den Balken der Wippe stellen soll. Das 2-kg-Gewicht darfst du zu irgendeinem Zeitpunkt selbst auf den Balken stellen und dann so lange verschieben, bis du damit zufrieden bist und mir sagst, wohin ich das nächste Gewicht stellen soll.“

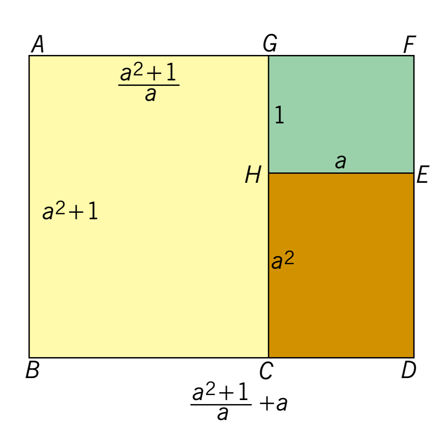
Wie sollte er vorgehen, und wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass er alle Gewichte mit Sicherheit richtig benennen kann?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zehn Sanduhren „Paradox“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 12. März 2002, eingehen.



Lösung zu „Ähnliche Äcker“ (Januar 2002)



Der rechteckige Acker, der sich in drei dem Acker selbst ähnliche, aber unterschiedliche Rechtecke teilen lässt, hat das Seitenverhältnis

$$\sqrt{\frac{1+\sqrt{5}}{2}}\,.$$

Annelies Paulitsch aus Hamburg setzte den Acker aus lauter ähnlichen Teilstücken zusammen, mit dem kleinsten beginnend: Das Rechteck *EFGH* hat die Seitenlängen $\overline{GH}=1$ (willkürlich festgelegt) und $\overline{HE}=a$ mit noch unbekanntem Seitenverhältnis a. Da das Rechteck *CDEH* dem kleinen grünen Rechteck ähnlich sein soll, muss $\overline{CH}=a^2$ sein. $\overline{AB}$ beträgt damit a^2+1. Wenn das Rechteck *ABCG* wiederum dasselbe Seitenverhältnis haben soll, so muss $\overline{AG}$ die Länge $(a^2+1)/a$ haben. Daraus ergibt sich

$$\overline{BD}=\frac{a^2+1}{a}+a\,.$$

Wenn nun auch das Gesamt-Rechteck *ABDF* wieder das Seitenverhältnis a zu 1 haben soll, muss für a die folgende Bestimmungsgleichung gelten:

$$\frac{\frac{a^2+1}{a}+a}{a^2+1}=a$$

Daraus folgt nach Umformungen

$$\frac{2a^2+1}{a}=a^3+a$$

und daraus wiederum

$$a^4-a^2-1=0\,.$$

Das ist eine quadratische Gleichung für die Unbekannte a^2. Man löst sie auf dem üblichen Wege und findet als einzige reelle Lösung

$$a=\sqrt{\frac{1+\sqrt{5}}{2}}\,,$$

die Wurzel aus dem Verhältnis des goldenen Schnitts.

Die Gewinner der zehn Bildkalender „Wege durch das All“ sind Annelies Paulitsch, Hamburg; Georg Kurz, Schwieberdingen; Horst Willigmann, Sindelfingen; Matthias Kusber, Nürnberg; Thankmar Sauerland, Hagen; Michael Huke, Hofgeismar; Clemens Raab, Puchenau/Linz; H. H. Meyer, Dormagen; Siegfried Reinwald, Kürten; und Gabi Krämer, München.

Leider ist unsere im Dezember 2001 abgedruckte Lösung der dritten Teilaufgabe vom Oktober falsch.

Anne sieht bei Bernd (13,17) und weiß damit, dass sie (7,17), (11,13) oder (13,17) trägt. Davon wird die Möglichkeit (11,13) durch ihr eigenes und Bernds erstes „Ich weiß nicht“ ausgeschlossen.

Nehmen wir an, Anne hat (7,17). Dann weiß Bernd, dass er (13,17) oder (17,19) hat. Wenn Anne bei Bernd (17,19) sähe, hätte sie die Auswahl zwischen (7,17) oder (23,31) für sich selbst. Letztere kann sie zwar ausschließen, Bernd aber nicht, da er „im Gegensatz zu uns und Anne die obere Grenze 30 nicht kennt“, so Horst Krämer aus Mannheim.

So wie es aussieht, hat Pierre Tougne versehentlich eine unlösbare Aufgabe gestellt. Wir bitten um Entschuldigung!

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal Wissenschaft Online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Die Herren der Ringe

Ähnlich wie Saturn verfügen auch die anderen Riesenplaneten in unserem Sonnensystem über eine Vielzahl von dünnen Ringen. Ein kompliziertes Wechselspiel der Kräfte hat diese fein strukturierten Ringsysteme entstehen lassen.

Weitere Themen im April

Die Himba und der große Damm

Die Kultur eines afrikanischen Stammesvolkes droht in den Fluten eines Stausees unterzugehen. Dies sei eben der Preis des Fortschritts, glauben Vertreter der Namibischen Regierung.

Wenn die Augen im Alter nur noch verschwommen sehen

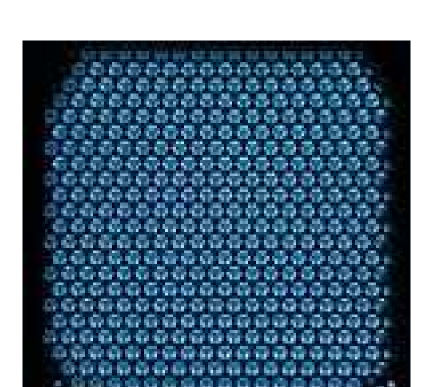
Jeder fünfte alte Mensch erleidet Augenschäden im Zentrum der Netzhaut – sodass er nicht mehr scharf sehen kann. Die Ursachen dieser Makula-Degeneration beginnen Wissenschaftler erst jetzt zu verstehen.

Die fortpflanzungsfähige Maschine

Kann ein künstliches Gerät eine getreue Kopie seiner selbst herstellen? Im Prinzip ja – aber vorläufig verlegen sich die Forscher aufs Simulieren.

Wie wir zu vernunftbegabten Wesen wurden

Gut 100 000 Jahre lang verfügten Frühmenschen über ein modernes Gehirn, ohne es richtig zu nutzen. Erst der eher zufällige Erwerb von Sprache und damit der Fähigkeit zum symbolischen Denken entfaltete jene geistigen Fähigkeiten, die uns vom Rest der Tierwelt unterscheiden.



Photonische Kristalle

Mikroskopische Lochmuster können bestimmte Lichtwellenlängen selektieren. Solche „optischen Halbleiter“ versprechen vielfältige Anwendungen für Glasfasern, winzige Laser und optoelektronische Schaltkreise.